

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Marburg/L.
Direktor: Prof. Dr. H. Hensel

Respiratorische Einflüsse auf die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes beim Menschen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der gesamten Medizin
der hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Pál Petrányi
aus Győr/Ungarn

Marburg 1966

Fotodruck von Erich Mauersberger in Marburg

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Marburg/L.

Direktor: Prof. Dr. H. Hensel

Respiratorische Einflüsse auf die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes beim Menschen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der gesamten Medizin
der hohen Medizinischen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Pál Petrányi

aus Győr/Ungarn

Marburg 1966

Fotodruck von Erich Mauersberger in Marburg



Angenommen von der Medizinischen Fakultät der
Universität Marburg am 18. 5. 1966.

Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät.

Dekan: Prof. Dr. med. O. Braun-Falco

Referent: Priv.-Doz. Dr. med. K. Golenhofen

Correferent: Prof. Dr. med. W. Straub.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	3
II. Methodik	6
1. Versuchsanordnung	6
2. Durchführung der Versuche	9
3. Auswertung	10
III. Ergebnisse	13
1. Abhängigkeit der mittleren Reaktions- Kennwerte von der Atemfrequenz	13
a) Spontanatmung	13
b) Willkürliche Atemverlangsamung und Atemanhalten	13
2. Phasische Einflüsse der Atmung auf die Pupillendynamik	15
a) Spontanatmung	15
b) Willkürliche Atemverlangsamung	22
c) Inspiratorisches und expiratori- sches Atemanhalten	25
3. Allgemeine Befunde zum Pupillen- Lichtreflex	28
IV. Besprechung der Ergebnisse	38
1. Respiratorische Einflüsse auf die Latenzzeit	38
2. Respiratorische Einflüsse auf den Ab- lauf des Pupillen-Lichtreflexes	39
3. Zum Konzept der "kollektiven Merkmals- verschiebung"	41
V. Zusammenfassung	42
VI. Tabellen	49
VII. Literaturverzeichnis	49



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554402_0017

I. Einleitung

Es gehört zu den ältesten Erfahrungen, daß die Pupille nicht nur auf Beleuchtungsänderungen reagiert, sondern auch seelische Regungen und Emotionen in empfindlicher Weise zum Ausdruck bringt. Otto LÖWENSTEIN (1953), der wohl die größten Erfahrungen über die Pupillenreaktion besitzt, hat dies so formuliert: "Die Pupille kontrahiert oder erweitert sich bei jeder Veränderung des Beleuchtungsgrades; sie erweitert und kontrahiert sich aber auch bei jeder Veränderung der Bewußtseinslage. Jeder Denkvorgang, jede Willensanstrengung und jede Emotion, so flüchtig sie auch sein mag, beeinflusst das Verhalten der Pupille, indem sie nicht nur den Grad der Verengerung oder Erweiterung bestimmt, sondern -gerade indem sie das tut- zu typischen Bewegungsabläufen führt. Das sind altbekannte Tatsachen, und schon vor 80 Jahren hat der Genfer Physiologe SCHIFF die Pupille das 'feinste Aesthesiometer der Seele' genannt." Es ist deshalb verständlich, daß sich neuerdings auch die Psychologie der Pupillographie zugewandt hat (E.H.HESS 1965; vgl. Spiegel 1965 Nr. 18). Die älteren Erfahrungen sind in folgenden Arbeiten zusammengestellt: BUMKE 1904; BACH 1908; WEILER 1910; BEHR 1924 und HESS 1924.

Die Möglichkeiten zur Messung und Aufzeichnung des Pupillenspiels sind durch die methodischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte wesentlich gefördert worden. Der Beginn der Pupillographie kann auf das Jahr 1885 angesetzt werden, als BELLARMINOFF einen "Photocoreograph" beschrieb, der eine photographische Aufzeichnung der Pupillenbewegungen erlaubte. Dieses Verfahren wurde in der Folgezeit zur Kinematographie ausgearbeitet und mit den Fortschritten der Phototechnik weiterentwickelt (WEILER 1910; LÖWENSTEIN; genauere Beschreibung der methodischen Entwicklung bei PETERSEN 1956).

Einen wesentlichen Fortschritt stellt die Einführung der Infrarot-Reflexphotometrie durch MATTHES (1941) dar. Bei diesem Verfahren wird pupillomotorisch inaktives Infrarotlicht auf Iris und Pupille geworfen und das reflektierte Licht mit einer Photozelle aufgefangen. Da praktisch nur

das auf die Iris auffallende Licht reflektiert, das durch die Pupille fallende Licht hingegen nahezu vollständig absorbiert wird, können auf diese Weise Änderungen der Pupillenweite fortlaufend gemessen und registriert werden. Diese Methode ist im Vergleich zur Kinematographie sehr einfach und besitzt ein großes zeitliches Auflösungsvermögen, welches kinematographisch nur durch hohe Bildfrequenz (über 100/sec) erreicht werden kann.

LÖWENSTEIN u. LOEWENFELD (1958) haben ein Verfahren angegeben, bei dem die Pupillenfläche durch einen feinen Lichtstrahl abgetastet und automatisch der maximale Durchmesser aufgezeichnet wird. Diese "elektronische Pupillographie" liefert in der von VARJÚ (1964a u.b) verwendeten Anordnung etwa 50 Meßwerte/sec. Dieses Verfahren ist zweifellos sehr elegant und besitzt viele Vorzüge, ist aber in dem zeitlichen Auflösungsvermögen zur Zeit der fortlaufenden Reflexphotometrie noch unterlegen. Der Unterschied zur Reflexphotometrie besteht ferner darin, daß bei letzterer der Meßwert etwa proportional der Pupillenfläche, bei der elektronischen Pupillographie jedoch proportional dem Pupillendurchmesser ist. Die Reflexphotometrie gibt also die Bedingungen für den Lichteinfall ins Auge direkter wieder.

Mit den verbesserten Methoden ist es vor allem möglich geworden, die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes eingehend zu studieren. DRISCHEL (1957 a-c, 1965) hat mit der Reflexphotometrie an einem großen Kollektiv die individuellen Unterschiede in der Kinetik des Pupillenreflexes auf Lichtblitze untersucht und gelangte zu einer "dynamischen Typologie" mit zwei polar-differenzierten Extremtypen, der "hyperkinetischen" und der "hypokinetischen" Reflexform. Zwischen diesen lagen mit fließenden Übergängen die "normokinetischen" Abläufe. Durch pharmakologische Beeinflussung des vegetativen Tonus konnte er den hyperkinetischen Typ dem Sympathikus und den hypokinetischen Typ dem Parasympathikus zuordnen. LÖWENSTEIN hatte (bei Verwendung längerer Lichtreize) 4 verschiedene Reaktionstypen unterschieden (LÖWENSTEIN u. FRIEDMAN 1942), die sich aber der polaren

Einteilung nach DRISCHEL einordnen lassen (DRISCHEL 1957b). DRISCHEL hat vor allem auch darauf hingewiesen, daß die Dynamik des Pupillenlichtreflexes ein wesentlich empfindlicherer Indikator für die Veränderungen im vegetativen Tonus ist als die statische Pupillenweite.

In einer Reihe weiterer Untersuchungen wurde der Pupillenlichtreflex einer regeltheoretischen Analyse unterzogen, meist unter Verwendung der Reflexphotometrie (BLEICHERT u. WAGNER 1957a u.b; STARK u. SHERMAN 1957; STARK 1957; STEGEMANN 1957; KÜNKEL 1961; HORNUNG u. STEGEMANN 1963), teils mit der elektronischen Pupillographie (VARJU 1964a u.b).

TIEDT (1963) hat den Tagesgang der Pupillendynamik untersucht, nachdem von DÖRING u. SCHAEFERS (1950) schon tagesrhythmische Änderungen der statischen Pupillenweite beschrieben worden waren.

Die bisherigen pupillographischen Erfahrungen ließen erwarten, daß auch höherfrequente endogene Schwankungen des vegetativen Tonus, die sich in der statischen Pupillenweite noch nicht zeigen, in der Reflexdynamik zum Ausdruck kommen. KÜNKEL (1961) hat bei Messung über mehrere Minuten rhythmische Schwankungen der verschiedenen Kennwerte gefunden, was auch DRISCHEL (1957a) schon kurz erwähnt hat. Die Abhängigkeit von anderen Rhythmen des entsprechenden Frequenzbereiches wurde jedoch nicht geprüft.

In der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluß der Atmung auf die Pupillendynamik geprüft werden, da der Atemrhythmus in besonders starkem Maße die vegetative Gesamtlage des Organismus beeinflusst, was vor allem von den Effekten auf den Kreislauf her bekannt ist.

II. Methodik

1. Versuchsanordnung

Zur fortlaufenden Aufzeichnung der Pupillenbewegung wurde die von MATTHES (1941) angegebene und von DRISCHEL (1957a) weiterentwickelte Methode der Infrarot-Reflexphotometrie, deren Prinzip einleitend schon beschrieben wurde, mit geringen Modifikationen angewandt.

Abb. 1 gibt die hier gewählte Versuchsanordnung schematisch wieder. Als Lichtquelle diente eine 6 Volt, 30 Watt Monlampe (Fa. Leitz, Wetzlar), deren Leuchtdichte mit Hilfe eines Regeltransformators und eines Amperemeters beliebig eingestellt werden konnte. Für die Messung wurde nie eine Leistung über 20 W benötigt. Eine Wasserkühlung der Lampe war nicht erforderlich. Das durch die Optik gebündelte und mit Hilfe einer Irisblende justierte Licht wurde durch ein Infrarotfilter geleitet. Der Reintransmissionsgrad τ des verwendeten Filters (Typ RG 7, Fa. Schott & Gen., Mainz) steigt bei doppeltlogarithmischer Darstellung zwischen den Wellenlängen 730 und 1050 nm von 10^{-5} praktisch linear bis zu 0,75 an.*) Bei der notwendigen Beleuchtungsstärke konnte die Versuchsperson den Leuchtfaden der Glühbirne gerade noch dunkelrot wahrnehmen. Das Lichtbündel wurde weiterhin durch die innere Öffnung (8mm $\varnothing$) eines Ring-Photoelementes auf die Iris des rechten Auges geleitet. Das Element besteht aus 4 hintereinandergeschalteten Si-Photoelementen (10 x 20 mm Oberfläche, Fa. Dr.B.Lange, Berlin), welche um die innere Öffnung angeordnet sind. Die spektrale Empfindlichkeit ist zwischen 600 und 1000 nm maximal.

Das von der Iris reflektierte Rotlicht wird von dem Photoelement aufgefangen und über einen Gleichstromverstärker (Zerhackerverstärker) fortlaufend registriert (Direktschreiber der Fa.F.Schwarzer GmbH, München, maximale Empfindlichkeit 30 μ V/cm, obere Frequenzgrenze für 90% der Amplitude: 60 Hz.) Als Papiergeschwindigkeit wurde 30 mm/sec

*) "Farb- und Filterglas für Wissenschaft und Technik"
Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Mainz 1959

gewählt, der Schreibbereich betrug 60 mm.

Zur Auslösung des Lichtreflexes diente gleichfalls eine Monla-Lampe, die seitlich so aufgestellt war, daß die parallelen Strahlen einen Winkel von etwa 30° mit der Blickrichtung bildeten. So wurden mehr die nasalen Partien der Netzhaut des linken Auges belichtet. Die Reizlichtintensität betrug vor dem linken Auge 100 lx. Zum rechten Auge gelangte nur etwas Streulicht, das gerade zur Reizmarkierung durch das Photoelement genügte. Mit dieser Anordnung wird also die konsensuelle Pupillenreaktion erfaßt. Der an der Monla-Lampe angebrachte Photoverschluß erlaubt eine Variation der Belichtungsdauer zwischen 1 und $1/100$ sec, für diese Versuche wurden stets Lichtblitze von $1/100$ sec gewählt.

Der Kopf der Versuchsperson wurde durch eine Kinn-Stirn-Stütze sorgfältig fixiert und mit einem Gurt festgeschnallt. Durch Höheneinstellung von Kopfstütze und Sitzhocker wurde für eine bequeme Haltung der Versuchsperson Sorge getragen, um eine ungestörte Spontanatmung zu gewährleisten. Die Versuchsperson hatte ein in 6 m Abstand vor dem Auge angebrachtes schwaches rotes Lämpchen zu fixieren, wodurch die Augenachse festgelegt und Konvergenzreaktionen vermieden wurden. Lichtquelle und Photoelement waren zentriert auf einer optischen Bank montiert, so daß das Photoelement zunächst etwas zurückgeschoben und nach Justierung dicht an das Auge herangeschoben werden konnte. Für die Justierung der Irisbeleuchtung mußte schwaches Weißlicht verwendet werden, da das der Registrierung dienende Infrarotlicht nicht sichtbar war. Andere Untersucher (DRISCHEL 1957 und TIEDT 1963) verwendeten demgegenüber zur Justierung der Irisbeleuchtung das Infrarotlicht, welches auch der Registrierung diente. Wir fanden jedoch beim Vergleich verschiedener Filter, daß Infrarotlicht, welches zugleich die Justierung erlaubte, schon zu leichten Pupillenreaktionen führen kann. Nach der Justierung wurde das Infrarotfilter eingeschaltet und die endgültige Leuchtdichte eingestellt. Um Fehlerquellen auszuschließen, wurde am Ende jedes Versuches die Einstellung wiederum bei sichtbarem Licht kontrolliert.

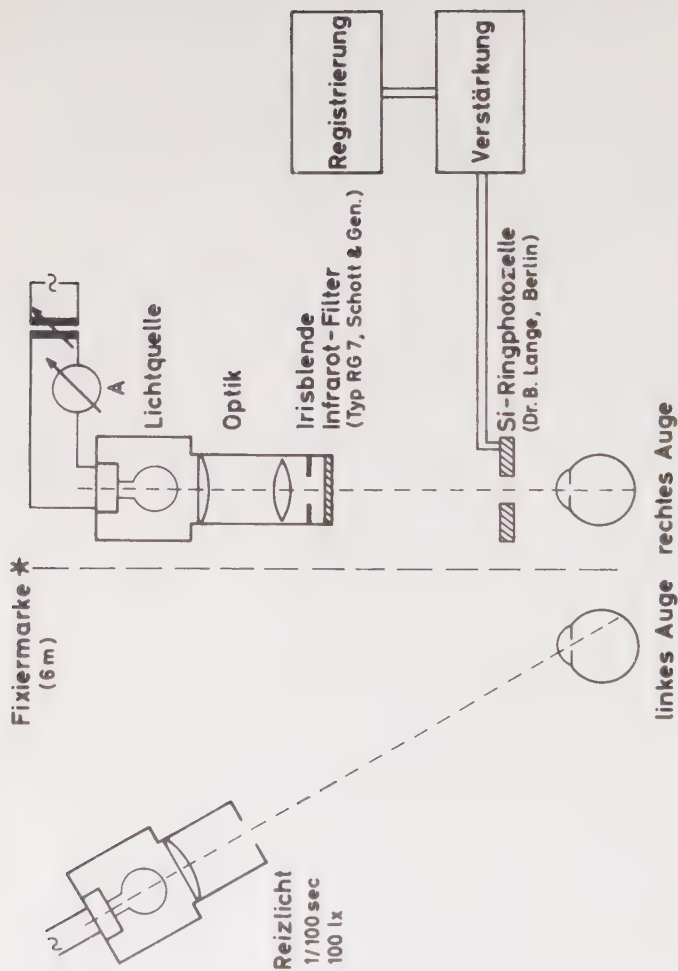


Abb. 1 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Registrierung der kon-sensuellen Pupillenreaktion (modifiziert nach DRISHEL 1957a). Links Reiz-licht, rechts photoelektrische Registrierapparatur. Einzelheiten im Text.

Gleichzeitig wurde die Atmung mit einer pneumatischen Manschette (Manschettendruck 15 - 20 mm Hg) am Rumpf in Gürtelhöhe abgegriffen. Die atemsynchronen Druckschwankungen in der Manschette wurden mit Hilfe eines photoelektrischen Elongationsgebers (Fa. F.Schwarzer GmbH, München) und Gleichstromverstärkers auf einen weiteren Kanal des Direkt-schreibers übertragen und mitregistriert.

2. Durchführung der Versuche

Die Untersuchungen wurden an gesunden männlichen und weiblichen Versuchspersonen nachmittags zwischen 15 und 18 Uhr durchgeführt. Die Messungen wurden nach einer Dunkeladaptation von mindestens 15 min in völlig verdunkeltem Raum begonnen.

Versuchsreihe I: An 10 Versuchspersonen (6 ♂, 4 ♀) im Alter von 20 - 34 Jahren wurden bei unbeeinflusster Spontanatmung mindestens je 50 Pupillenreaktionen registriert. Die Lichtblitze wurden im Abstand von 10 sec ohne Berücksichtigung des Atemablaufs ausgelöst. Auf diese Weise wurde eine zufällige Verteilung der Lichtreize innerhalb der Atemphase erreicht. Um den spontanen Atemablauf nicht zu beeinflussen, wurde den Versuchspersonen über den Zweck der Atemmanschette keinerlei Mitteilung gemacht.

Versuchsreihe II: An 6 Versuchspersonen (4 ♂, 2 ♀) der oberen Gruppe wurden die Lichtreaktionen bei willkürlich verlangsamter Atmung gemessen. Hier wurden je 30-40 Reaktionen hintereinander im Abstand von 10 sec registriert. Die Versuchsperson erhielt die Aufgabe, die Atmung zu verlangsamen und auf eine für sie noch bequeme Frequenz einzustellen.

Versuchsreihe III: An 6 Versuchspersonen (4 ♂, 2 ♀), gleichfalls aus der Gruppe von Versuchsreihe I, wurden mindestens je 10 Reaktionen innerhalb der ersten 2-4 sec eines forciert inspiratorischen und je 10 während eines expiratorischen Atemstillstandes ausgelöst. Zwischen den einzelnen Tests konnten die Versuchspersonen spontan atmen.

3. Auswertung

Zur quantitativen Bestimmung der Pupillenreflex-Dynamik wurden die registrierten Lichtreaktionen in Anlehnung an die früheren Untersuchungen nach dem Schema in Abb. 2 ausgemessen. Es schien uns jedoch zweckmäßig, die Begriffe "Gipfel", "Anstieg" und "Abstieg" zu vermeiden, da diese je nach Polung der Meßgeräte vieldeutig sind. Die hier gewählte Benennung der verschiedenen Zeitkennwerte ergibt sich aus Abb. 2. Die von DRISCHEL (1957), KÜNKEL (1961) sowie TIEDT (1963) zur Kennzeichnung der Wiedererweiterung verwendete Zelntelwertzeit scheint nur dann günstig, wenn die Messung -wie bei den genannten Autoren- mit AC-Verstärkern durchgeführt wird (untere Grenzfrequenz etwa 0,05 Hz). Bei der hier gewählten Gleichstrom-Verstärkung wurde stattdessen die Dilatations-Viertelwertszeit verwendet ($t_{D/4}$).

Mit Hilfe einer Meßlupe von 7facher Vergrößerung konnten Abstände von 0,1 mm abgegriffen und so eine Ablesegenauigkeit von 3,3 msec erreicht werden. Bei der Auswertung mußten diejenigen Reaktionen vernachlässigt werden, die grobe Störungen, z.B. durch Lidschlag, aufwiesen. Die gewonnenen Kenngrößen von jedem einzelnen Pupillogramm wurden zu der mitregistrierten Atemkurve in Beziehung gesetzt. Dazu wurden die Atemperioden (von Inspirationsbeginn zu Inspirationsbeginn) in 10 Klassen von je 10% der Periodendauer eingeteilt und der Moment des Lichtblitzes diesen Klassen zugeordnet, wie das in Abb. 3 erkennbar ist. Die ausgemessenen Kenngrößen des Pupillogramms wurden zunächst den Atemphasen zugeordnet, in die der auslösende Lichtreiz gefallen war. Später wurden die langen Kennzeiten vergleichsweise auch von ihrem Endpunkt her der Atemphase zugeordnet.

Da die Mittelwerte der Kenngrößen der verschiedenen Versuchspersonen stark voneinander abwichen, wurden für bestimmte Fragestellungen zur Eliminierung interindividueller Unterschiede alle Einzelwerte in % des individuellen Mittelwertes umgerechnet.

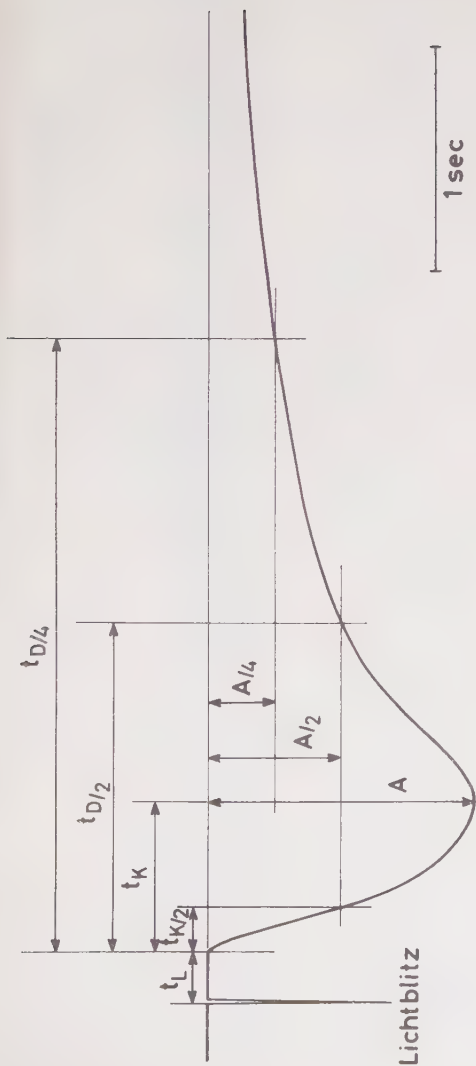


Abb. 2 Halbschematische Darstellung zur Auswertung des Pupillogrammes. Der Reflexablauf ist nach den Mittelwerten von 436 Reaktionen bei 10 Versuchspersonen aufgezeichnet. t_L Latenzzeit; $t_{K/2}$ Kontraktions-Halbwertszeit; t_K Kontraktionszeit; $t_{D/2}$ Dilatations-Halbwertszeit; $t_{D/4}$ Dilatations-Viertelwertszeit; A Amplitude.

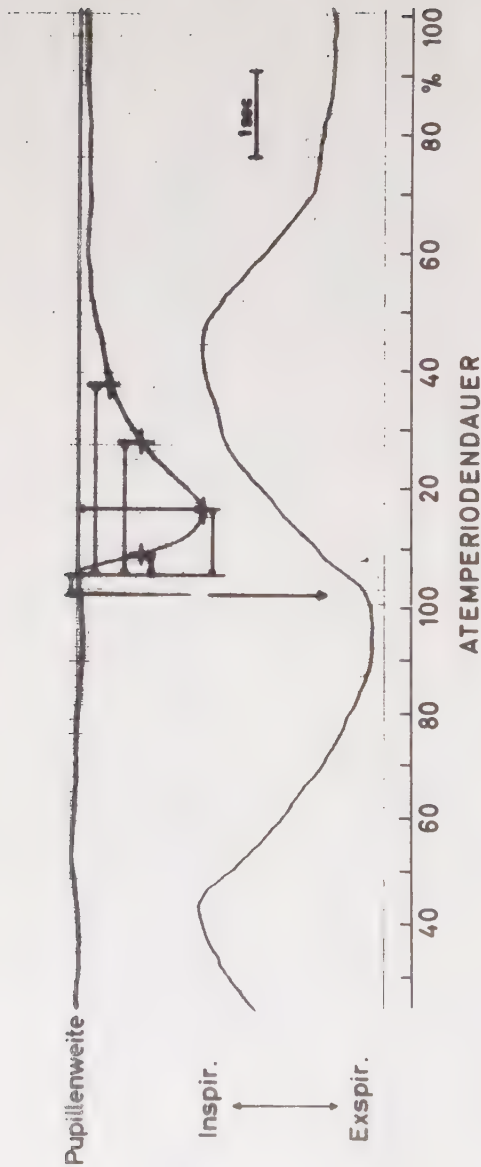


Abb. 3 Registrierbeispiel einer gleichzeitigen Aufzeichnung von Pupillenweite und Atmung. Die Atemperioden wurden in 10 Klassen von je 10% der Atemperiodendauer unterteilt. Die zeitliche Zuordnung der Kennwerte des Pupillogrammes zu diesen Klassen ist durch Pfeil angegeben. Die Registriergeschwindigkeit betrug 30 mm/sec.

Die Berechnung der Streuung (σ) und des mittleren Fehlers des Mittelwertes (σ_M) erfolgte nach den Formeln

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}} \quad \sigma_M = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Die p-Werte wurden bei der Signifikanzprüfung für die Differenz zweier Extremwerte nach dem t-Test von STUDENT errechnet.

III. Ergebnisse

1. Abhängigkeit der mittleren Reaktions-Kennwerte von der Atemfrequenz

a) Spontanatmung

In Tab. 1 sind die individuellen Mittelwerte aller Kenngrößen des Pupillen-Lichtreflexes aus Versuchsreihe I, geordnet nach der spontanen Atemfrequenz der Versuchspersonen, zusammengestellt. Während die Latenzzeit (t_L) keine Abhängigkeit von der individuellen Atemfrequenz erkennen läßt, wird eine solche Abhängigkeit bei den längeren Kenngrößen des Pupillen-Lichtreflexes zunehmend deutlich. Dieses ist vor allem im Diagramm der Abb. 4 gut zu erkennen.

b) Willkürliche Atemverlangsamung und Atemanhalten

Zur Prüfung der Frage, ob der beschriebene Einfluß der Atemfrequenz auf den Pupillen-Lichtreflex direkt vom motorischen Atemablauf bestimmt wird, wurde bei einem Teil der Versuchspersonen die Reflexdynamik bei willkürlich verlangsamter Atmung und bei Atemanhalten untersucht (Versuchsreihe II). Die Darstellung kann hier auf t_K und $t_{D/4}$ be-

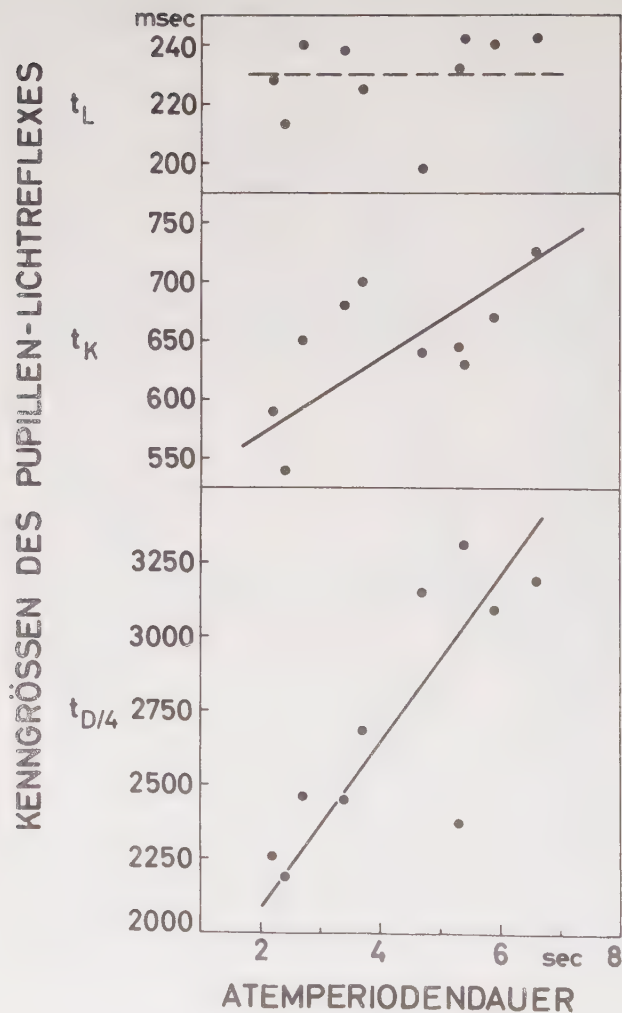


Abb. 4 Abhängigkeit der individuellen Mittelwerte einiger Kennzeiten des Pupillen-Lichtreflexes vom individuellen Mittel der Atemperiodendauer. Nach den Zahlenwerten von Tab. 1. Der Ordinatenmaßstab ist so gewählt, daß gleiche prozentuale Änderungen der verschiedenen Kenngrößen gleichen Teilstrecken entsprechen. Für t_K ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von $r = + 0,62$ ($p = 0,01$), für $t_{D/4}$ ein $r = + 0,782$ ($p < 0,001$).

schränkt werden, da die Latenzzeit wie in Abb. 4 keine Frequenzabhängigkeit erkennen ließ. Wie Tab. 2 zeigt, wurden bei willkürlicher Verlangsamung der Atmung die Kenngrößen des Lichtreflexes nur geringgradig und uneinheitlich verändert. Die geringe durchschnittliche Verlängerung von $t_{D/4}$ (+ 4,2%) und von t_K (+ 0,5%) zeigt zwar die Beziehung von Abb. 4 qualitativ richtig an, was aber bei den großen interindividuellen Unterschieden kaum zu bewerten ist. Die im Durchschnitt starke Verminderung der Atemfrequenz bei der willkürlichen Atemverlangsamung (auf etwa 1/3 des Ausgangswertes) müßte eine Verlängerung von $t_{D/4}$ in der Größenordnung von + 50% bewirken, wenn die Korrelation der Abb. 4 auch bei willkürlicher Frequenzänderung unverändert erhalten bliebe. Der geringe Einfluß der Atemverlangsamung spricht dafür, daß die bestehende Abhängigkeit der Kennwerte von der individuellen spontanen Atemfrequenz nicht direkt von der Frequenz des Atemablaufs abhängt, sondern vielmehr von der spontanen Tendenz der respiratorischen Zentren.

Tab. 3 gibt die mittleren Reflex-Kennwerte bei Atemanhalten für einen Teil der Versuchspersonen der Gruppe I wieder (Versuchsreihe III). Alle Kenngrößen zeigen eine eindeutige Verlängerung im Vergleich zu den Mittelwerten bei Spontanatmung, sowohl inspiratorisch als auch expiratorisch. Am schwächsten ist der Effekt auf die Latenzzeit, was gut mit den Beziehungen von Abb. 4 sowie dem Verhalten bei willkürlicher Atemverlangsamung übereinstimmt. Die Verlängerung der übrigen Kenngrößen ist umso größer, je höher die spontane Atemfrequenz lag. Die stärkste Veränderung zeigt $t_{D/4}$.

2. Phasische Einflüsse der Atmung auf die Pupillendynamik

a) Spontanatmung

In Abb. 5 sind die Mittelwerte aller Kenngrößen des Pupillenlichtreflexes mit Angabe des mittleren Fehlers (σ_M) in Zuordnung zur Spontanatmung nach den Ergebnissen der Versuchsreihe I dargestellt. Zum besseren Vergleich sind alle Größen im gleichen Prozent-Maßstab aufgetragen. Besonders

deutliche respiratorische Einflüsse zeigt die Latenzzeit; die Kurve ist nahezu deckungsgleich mit der Atemkurve und besitzt nur eine geringe Streuung. Für die anderen Kenngrößen sind die Kurven der respiratorischen Schwankungen durchweg unregelmäßiger, die Streuung ist größer und die Differenz zwischen den respiratorischen Extremwerten ist mit Ausnahme von $t_{D/4}$ geringer als bei der Latenzzeit (t_L). Die respiratorischen Schwankungen sind für alle Größen außer $t_{D/2}$ statistisch signifikant (Abb. 9).

Zur besseren Beurteilung der respiratorischen Schwankungen sind in Abb. 6 die Atemkurven der einzelnen Kennwerte nach übergreifender Dreiermittlung dargestellt. Während t_L eine inspiratorische Verlängerung aufweist, zeigen die kurzen Kennzeiten ($t_{K/2}$, t_K) eine Verminderung bei gleichzeitiger Verminderung im Ausmaß der Pupillokonstriktion (Amplitude A). Die Wiedererweiterung wird hingegen -wie die Latenzzeit- bei den inspiratorisch ausgelösten Pupillenreaktionen verlängert ($t_{D/4}$).

Der respiratorische Verlauf der Dilatations-Viertelwertzeit erfordert eine genauere Analyse, da hier bei sehr starken respiratorischen Einflüssen eine besonders große Variabilität besteht, was darauf hinweisen könnte, daß die Atemabhängigkeit nicht einheitlich ist. In Abb. 7 sind deshalb alle individuellen Atemverläufe von $t_{D/4}$ nach übergreifender Dreiermittlung gesondert aufgetragen. In Teil a) der Abb. 7 ist die Zuordnung zur Atmung wie in Abb. 5 u. 6 vorgenommen, indem die Werte von $t_{D/4}$ nach der Lage des zugehörigen Lichtreizes der Atmung gegenübergestellt sind (vgl. Abb. 3). Da jedoch $t_{D/4}$ als längste der ausgemessenen Größen nicht im Augenblick des Lichtreizes festgelegt sein muß, sondern noch durch spätere Eingriffe der Atmung in den Ablauf der Pupillenreaktion beeinflusst werden kann, wurden die Werte von $t_{D/4}$ außerdem auch von ihrem Endpunkt aus der Atmung zugeordnet und in Abb. 7b dem anderen Auswertungsverfahren (Abb. 7a) gegenübergestellt. Die Versuche sind in Abb. 7 nach der spontanen Atemfrequenz der Probanden geordnet. Würde $t_{D/4}$ schon frühzeitig nach dem Lichtreiz endgültig festgelegt, so müßte sich bei den Auswertungsverfahren

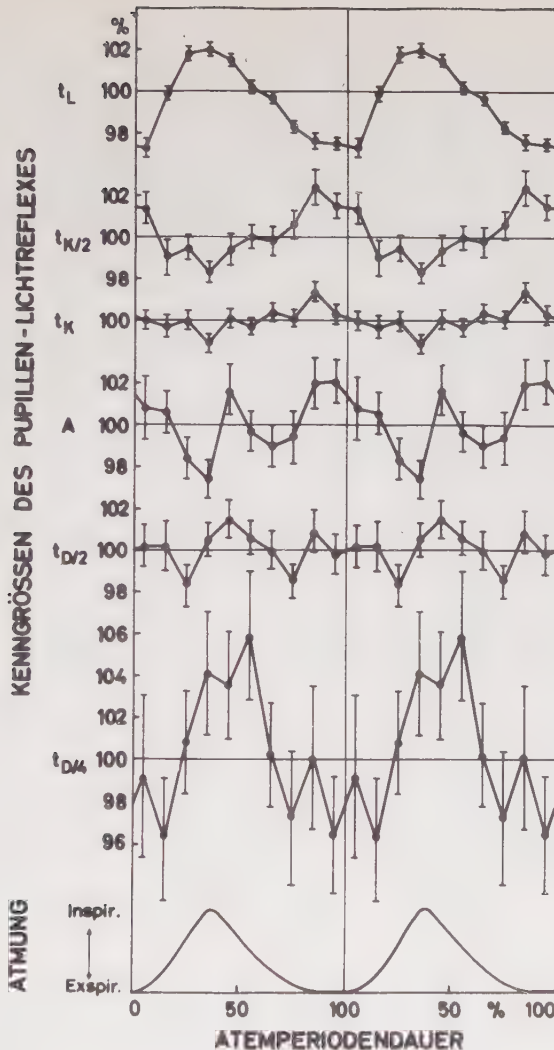


Abb. 5 Veränderungen des Pupillen-Lichtreflexes im Ablauf der Spontanatmung. Mittelwerte von 436 Pupillenreaktionen bei 10 Versuchspersonen. Die Kennwerte wurden jeweils in % des individuellen Mittelwertes umgerechnet. Die Klammern geben den mittleren Fehler der dargestellten Gesamtmittelwerte ($\sigma_{\bar{x}}$) an. Die Pupillenreaktionen wurden vom Reizmoment her der Atmung zugeordnet (vgl. Abb. 3). Der Verlauf der Atmung ist im unteren Bildteil halbschematisch dargestellt. Die Inspirationsdauer betrug durchschnittlich 36% der Atemperiodendauer bei einer mittleren Atemperiodendauer von 4,24 sec. Erklärung der Abkürzungen in Abb. 2.

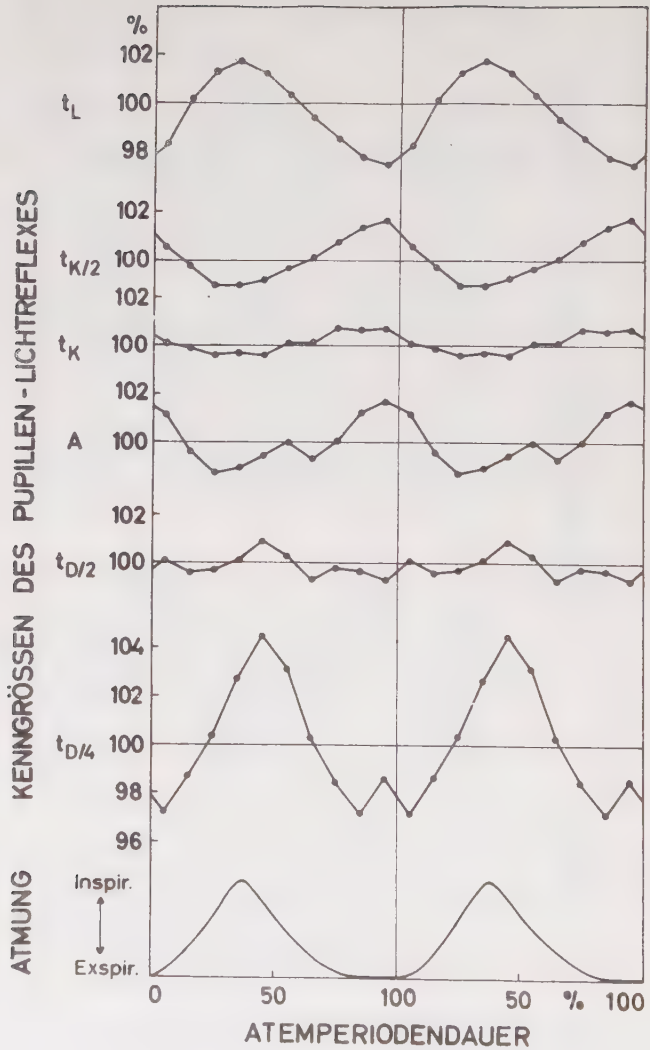


Abb. 6 Darstellung der Kurvenverläufe von Abb.5 nach Glättung durch übergreifende Dreiermittelung, ohne Angabe des mittleren Fehlers.

der Abb. 7 b) infolge der Variabilität von Atemperiodendauer und $t_{D/4}$ die Atemabhängigkeit weitgehend verwischen. Sie müßte umgekehrt sehr viel deutlicher werden, wenn der Atem- einfluß vorwiegend auf einem Eingriff während der Wiederer- weiterung selbst beruht. Die Gegenüberstellung der beiden Auswerteverfahren in Abb. 7 ergibt keine klare Antwort im Sinne der aufgezeigten Alternative. Einerseits wird die respiratorische Amplitude von $t_{D/4}$ in den Fällen, die in Abb. 7 a) die größten Effekte zeigen (Hö, Ge u. Be, Ampli- tuden 24-40 %), bei Atemzuordnung vom Endpunkt her (Abb.7b) deutlich vermindert (um 21-37% der Amplitude in Abb.7a), was für eine überwiegend frühe Prägung von $t_{D/4}$ spricht. Andererseits zeigen aber die Verläufe in Abb. 7b), jeden- falls für die Fälle mit langsamer Atmung unter 18/min, quali- tativ eine größere Einheitlichkeit als in Abb.7a), was auf eine späte Prägung von $t_{D/4}$ hinweist. Die Fälle mit hoher Atemfrequenz sind für die Beurteilung von $t_{D/4}$ naturgemäß nur bedingt verwertbar, da $t_{D/4}$ bei diesen in der gleichen Größenordnung liegt wie die Atemperiodendauer (vgl. Abso- lutwerte von $t_{D/4}$ in Tab. 1). Die Ergebnisse müssen insge- samt wohl so gewertet werden, daß sowohl frühe wie späte Einflüsse der Atmung auf $t_{D/4}$ bestehen, wobei das Schwerge- wicht von Fall zu Fall verschieden liegen kann. Im Mittel aller Versuche sind die respiratorischen Schwankungen von $t_{D/4}$ in Abb.7b) mit 6,1% um 1,2% geringer als in Abb.7a), was für ein gewisses Überwiegen des frühen Einflusses in dem geprüften Kollektiv spricht.

- Der direkte Atemeinfluß auf die Wiedererweiterung der Pu- pille ist in der Originalkurve der Abb. 8 deutlich erkenn- bar. Jede Inspiration führt mit einer gewissen Latenz zu einer verstärkten Wiedererweiterung. Die Latenz stimmt gut mit der durchschnittlichen Verschiebung des Minimums von $t_{D/4}$ in Abb. 7b) gegenüber dem Inspirationsgipfel überein. Wegen der Unterschiede in der individuellen Atemfrequenz verschiebt sich jedoch bei der Darstellungsweise in Abb. 7b) das Minimum von $t_{D/4}$ mit steigender Atemfrequenz zunehmend vom Inspirationsgipfel weg. Abb. 8 läßt auch erkennen, daß der inspiratorische Effekt auf $t_{D/4}$ ein überwiegend dynami- scher ist. Nach Erreichen der Pupillen-Ausgangslage finden

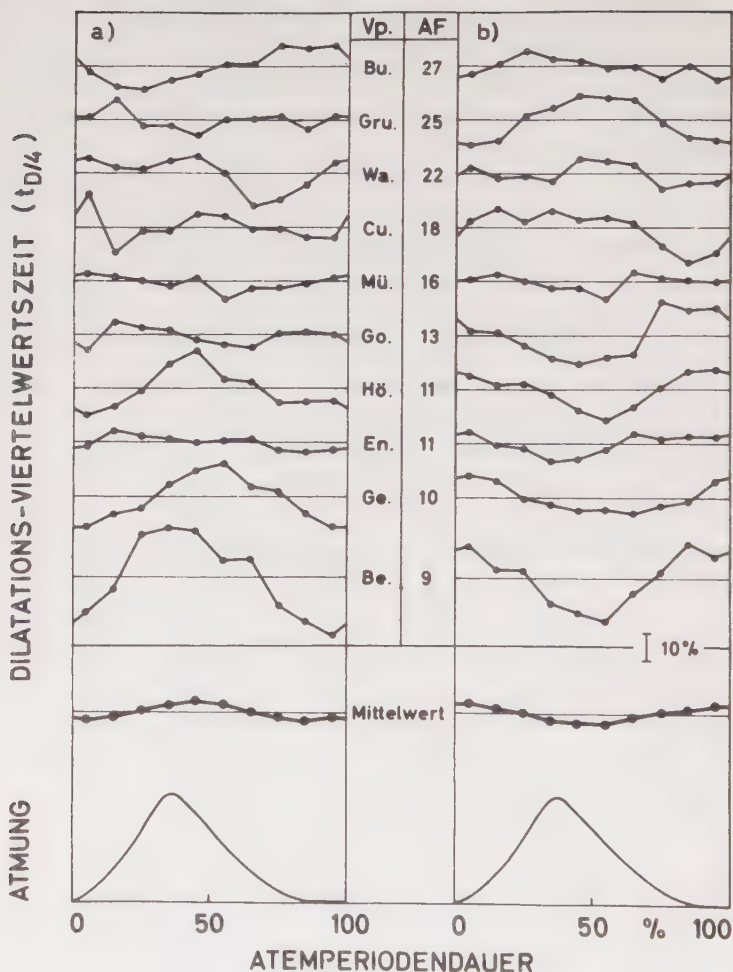


Abb. 7 Individuelle atemabhängige Verläufe von $t_{D/4}$, nach der spontanen Atemfrequenz (AF, in min^{-1}) $t_{D/4}$, nach geordnet. Darstellung in % der individuellen Mittelwerte, nach übergreifender Dreiermittelung. Darunter die Kurve der Gesamt-Mittelwerte, im gleichen Maßstab. Teil a): Zuordnung zur Atmung vom Reizmoment aus, wie in Abb. 5 u. 6; Teil b): Zuordnung von $t_{D/4}$ zur Atmung von ihrem Endpunkt her.

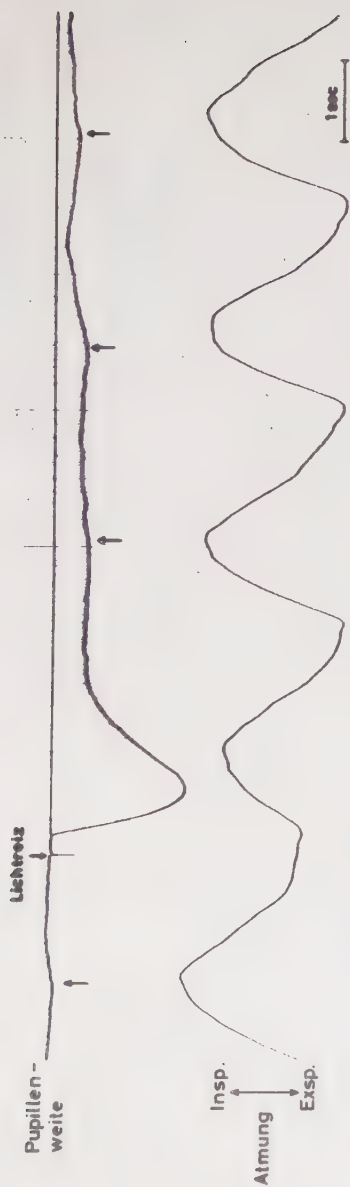


Abb. 8 Originalkurve. Respiratorische Einflüsse auf die späte Phase der Wiedererweiterung der Pupille nach einem Lichtblitz. Jede Inspiration führt mit einer Latenz von etwa 1 sec zu einer Pupillenerweiterung. Gleichartige Einflüsse können nach Abklingen der Licht-Reaktion zu einer atemsynchronen Pupillenerweiterung führen, wie sie in der Pupillenzweite vor dem Lichtreiz erkennbar ist.

sich nur noch geringe respiratorische Schwankungen der (statischen) Pupillenweite.

In Abb. 9 sind der extreme inspiratorische und der extreme expiratorische Ablauf des Pupillenlichtreflexes nach den Ergebnissen der Abb. 5 zur Veranschaulichung einander gegenübergestellt.

b) Willkürliche Atemverlangsamung

In Abb. 10 sind die respiratorischen Einflüsse auf die Dilatations-Viertelwertszeit bei willkürlicher Atemverlangsamung (Versuchsreihe II) dargestellt, und zwar zunächst wie in Abb. 7 alle individuellen Einzelverläufe, einmal bei Zuordnung zur Atmung vom Reizmoment aus (Abb. 10 a) und zum anderen bei Zuordnung vom Endpunkt (Abb. 10 b). Im Gegensatz zu Abb. 7 ergibt sich jedoch für die verlangsamte Atmung eine größere mittlere Amplitude von $t_{D/4}$ bei der Zuordnung vom Endpunkt her zur Atmung (Abb. 10 b). Das deutet darauf hin, daß bei willkürlicher Atemverlangsamung der direkte Einfluß der Atmung auf die späteren Teile des Pupillenreflexes überwiegt. Aus dem typischen Verhalten in Abb. 10b) fällt jedoch die obere Kurve heraus. In diesem Versuch lag die Atemfrequenz noch im Bereich spontaner Atemfrequenz, und dementsprechend weist diese Kurve auch eine Verlaufsförmigkeit auf, die sich bei Spontanatmung gleicher Frequenz in Abb. 7b) findet. Danach ist es berechtigt, für das mittlere Verhalten von $t_{D/4}$ in Abb. 11 die Ergebnisse von Abb. 10b) unter Vernachlässigung des oberen Falles zugrunde zu legen.

Abb. 11 zeigt das mittlere Verhalten von $t_{D/4}$ (ohne Glättung, mit Angabe des mittleren Fehlers der Mittelwerte) bei willkürlich verlangsamter Atmung in Gegenüberstellung zur Latenzzeit. Die anderen Kenngrößen des Pupillen-Lichtreflexes wurden bei der Zusammenstellung vernachlässigt, da sie, wie schon bei Spontanatmung, keine so markanten Atemeinflüsse erkennen ließen. Die Kurve der Latenzzeit zeigt bei verlangsamter Atmung mit 2,8 % Amplitude geringere atemsynchrone Schwankungen als bei Spontanatmung, wo die Amplitude 4,7% betrug. Dies bedeutet, daß die respiratorischen Latenzzeit-

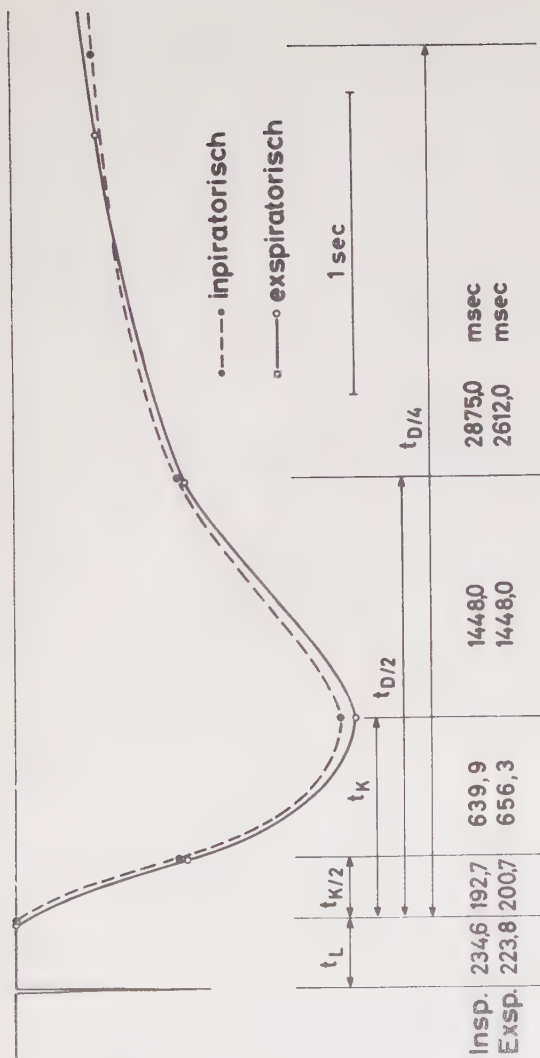


Abb. 9 Maßstabgetreue Gegenüberstellung des inspiratorischen und expiratorischen Reflexablaufes. Für jede Kenngröße wurden die inspiratorischen und expiratorischen Extremwerte nach den Ergebnissen der Abb. 5 zugrunde gelegt und in Absolutwerte umgerechnet. Signifikanz der Unterschiede (p-Werte) für t_L : $< 0,001$; $t_{K/2}$: $< 0,001$; t_K : $< 0,001$; $t_{D/4}$: $< 0,05$; A : $< 0,01$.

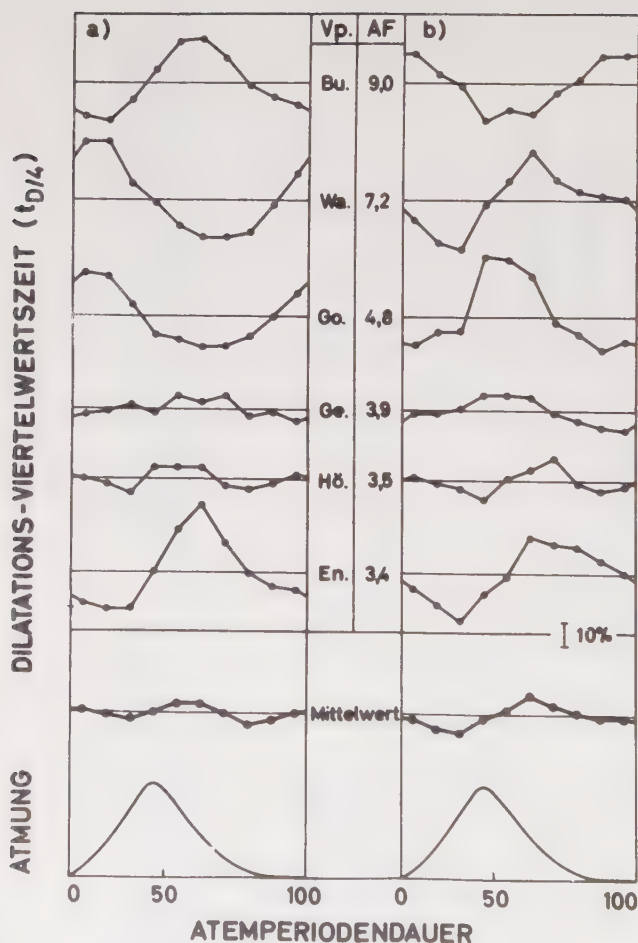


Abb. 10 Individuelle atemabhängige Verläufe von $t_{D/4}$ bei willkürlich verlangsamter Atmung, nach Atemfrequenz (AF, in min^{-1}) geordnet. Darstellung in % der individuellen Mittelwerte, nach übergreifender Dreiermittlung. Darunter die Kurve der Gesamt-Mittelwerte. Teil a): Zuordnung zur Atmung vom Reizmoment aus; Teil b): Zuordnung vom Endpunkt her.

schwankungen nicht vom Ausmaß der Atembewegung, die bei Verlangsamung natürlich vertieft waren, bestimmt werden. $t_{D/4}$ zeigt demgegenüber bei langsamer Atmung mit 30% Amplitude eine viel stärkere Atemabhängigkeit als bei Spontanatmung, wo die Amplitude nur 10,9 % betrug. $t_{D/4}$ zeigt weiterhin bei Atemverlangsamung eine bemerkenswerte Veränderung im Kurventyp der Atemabhängigkeit. Zunächst entspricht die Verminderung von $t_{D/4}$ während der Inspiration durchaus dem mittleren Verhalten in Abb. 7 b. Mit Beendigung der Inspiration erfolgt jedoch ein sehr plötzlicher Umschlag zu extrem langen Werten, der durch Glättung (in Abb. 10b) etwas verwischt und zeitlich verschoben wird. Es liegt nahe, diesen plötzlichen Umschlag als Folge einer im Ablauf der forcierten Einatmung stark zunehmenden zentralen expiratorischen Tendenz zu deuten, welche nach Beendigung der Inspiration plötzlich zur Wirkung kommt.

c) Inspiratorisches und expiratorisches Atemanhalten

Durch Anhalten der Atmung in tiefer Einatem- bzw. Ausatemstellung sollte geprüft werden, wieweit allein die Thoraxstellung, etwa reflektorisch über die Lungendehnungsrezeptoren, die Pupillendynamik beeinflussen kann. Die Ergebnisse (Versuchsreihe III) sind in Abb. 12 zusammengestellt. Für die Latenzzeit ergibt sich kein Unterschied zwischen inspiratorischer und expiratorischer Thoraxstellung. Dies paßt gut zu der Feststellung, daß die bei Spontanatmung ausgeprägten Latenzzeitschwankungen schon durch willkürliche Atemverlangsamung stark abgeschwächt werden. Von den übrigen Kennwerten zeigt vor allem $t_{D/4}$ wieder deutliche Effekte. Die in Inspirationsstellung verlängerte Viedererweiterung dürfte mit der plötzlichen Verlängerung am Ende der forcierten Einatmung bei Atemverlangsamung (Abb. 11) verwandt sein. Für die übrigen Kennwerte ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen Inspirations- und Expirationsstellung. Der statistisch signifikante Unterschied für $t_{K/2}$ ist schwer zu deuten.

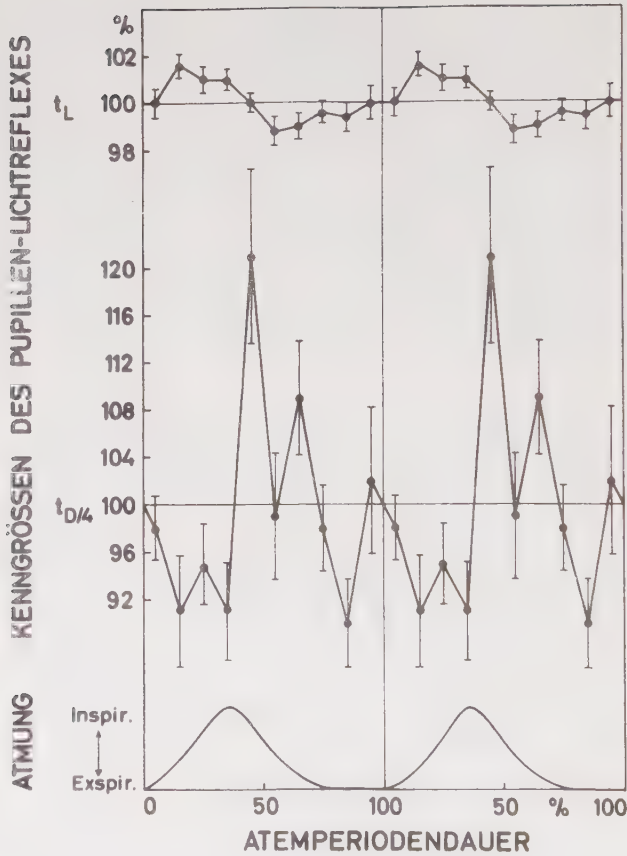


Abb. 11 Veränderungen von t_L und $t_{D/4}$ im Ablauf willkürlich verlangsamter Atmung. Die Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers des Mittelwertes (σ_M) an. Zuordnung von t_L zur Atmung vom Reizmoment aus, von $t_{D/4}$ vom Endpunkt her. Die Differenzen der inspiratorischen und expiratorischen Extremwerte von t_L und $t_{D/4}$ sind mit $p < 0,01$ signifikant. Die Inspirationsdauer betrug durchschnittlich 35% der Atempériodendauer. Gesamtmittel nach den Ergebnissen von Abb.10 b), unter Vernachlässigung des Falles Bu., ohne Glättung.

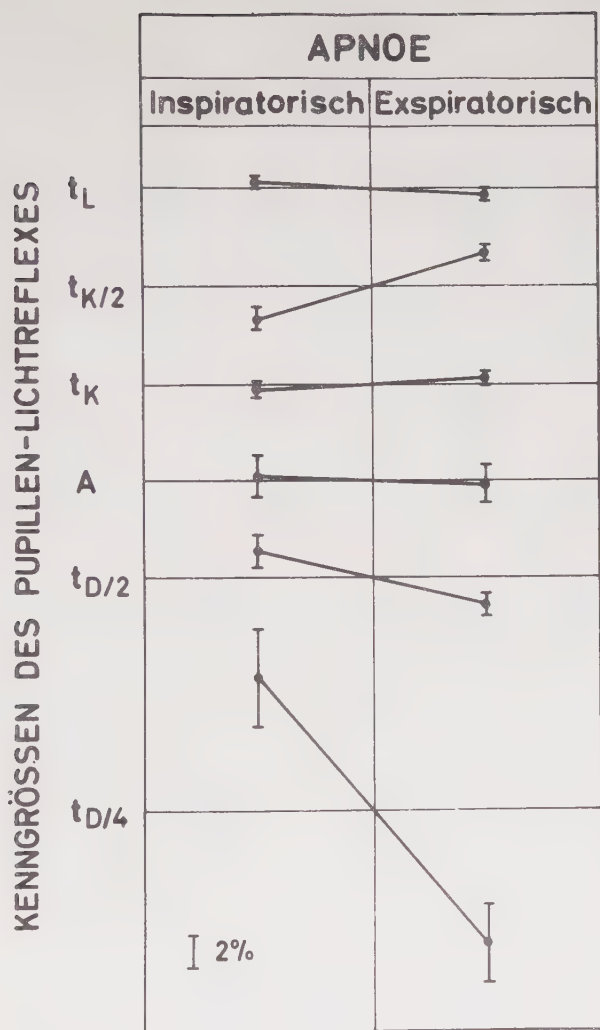


Abb. 12 Verhalten des Pupillen-Lichtreflexes während einer inspiratorischen und expiratorischen Atempause. Darstellung der Kennwerte in % der individuellen Mittelwerte. Jeder Punkt ist der Mittelwert von 48 Einzelmessungen bei 6 Versuchspersonen. Die Klammern geben den Bereich des mittleren Fehlers des Mittelwertes (σ_M) an. Die Differenzen sind für $t_{K/2}$ mit $p < 0,001$, für $t_{D/2}$ mit $p < 0,01$ und für $t_{D/4}$ mit $p < 0,001$ signifikant bzw. hochsignifikant.

3. Allgemeine Befunde zum Pupillen-Lichtreflex

Bei kurzdauernder Belichtung des Auges vollzieht die Pupille nach einer gewissen Latenz eine relativ rasche Verengung mit einer unmittelbar anschließenden langsameren Wiedererweiterung. LÖWENSTEIN (1953) gliederte sowohl die Kontraktions- wie die Wiedererweiterungsphase in einen primären und einen sekundären Anteil. Zur Aufgliederung der Kontraktionsphase verwendete er den Wendepunkt im Kurvenverlauf, welcher sich bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Differential-Kurve gut bestimmen läßt. In der primären Kontraktionsphase, bis zum Wendepunkt, verläuft die Kontraktion im Durchschnitt schneller als in der sekundären Phase. Die Erweiterungsphase wird gleichfalls in eine primäre, schnellere und in eine sekundäre, langsamere Phase untergliedert, wobei von LÖWENSTEIN jedoch nicht der Wendepunkt, sondern eine Nachwelle (E-Welle) in der Differentialkurve zur Abgrenzung verwendet wird.

Diese von LÖWENSTEIN an Hand von Reaktionen auf 1 sec-Lichtreize entwickelte Gliederung kann im Prinzip auch auf die Reaktionen nach Momentbelichtung übertragen werden (vgl. Abb.3). Die Verlangsamung der Kontraktionsgeschwindigkeit in der sekundären Verengungsphase wird während einer längeren Serie hintereinander ausgelöster Reflexe immer deutlicher (Abb.16, unten). CÜPPERS (1954) führte diese Verlaufsförmigkeit bei Belichtung von 1 sec auf die während der Belichtung fortschreitende Pupillenverengung zurück, welche zur Abnahme des Lichtreizes auf der Retina führt. Diese Deutung wurde von LOEWENFELD (1956) widerlegt. v.BRUNN u.Mitarb. (1941) haben dem Wechsel in der Kontraktionsgeschwindigkeit nach kurzem Lichtreiz keine Bedeutung zugemessen. Da dieses Phänomen auch bei Momentbelichtung nachweisbar ist, möchten wir mit LÖWENSTEIN annehmen, daß es sich hier um ein Charakteristikum des normalen Lichtreflexablaufes handelt. Eine "Haltezeit", wie sie PETERSEN (1957) beschrieb, haben wir in unserm Material nicht gefunden. Bei Durchsicht seiner Kurven stellt sich heraus, daß diese Haltezeit keineswegs eine konstante Erscheinung ist. Sie kann durch die Fehlerbreite der Methode bedingt sein, wie auch die starke oszillatorische Unruhe seiner Kurvenverläufe.

Die Angaben der verschiedenen Untersucher über die Zeitkennwerte des Lichtreflexes weisen recht erhebliche Unterschiede auf. Dies ist nicht verwunderlich, wenn man die große biologische Variationsbreite, die Zahl der Fehlermöglichkeiten und die verschiedenen Versuchsbedingungen in Betracht zieht. Werden z.B. längere Lichtreize (1 sec) zur Auslösung des Reflexes verwendet, so nehmen Kontraktions-Tiefe und -Dauer und damit die gesamte Reflexdauer zu. Zum Vergleich unserer Ergebnisse über den zeitlichen Verlauf der Lichtreaktion können wir deshalb nur Angaben derjenigen Untersucher heranziehen, die zur Auslösung des Reflexes Lichtblitze verwendet haben (Tab.4). Eine ausführliche tabellarische Zusammenstellung über die zeitlichen Verhältnisse des Reflexablaufes findet sich bei DRISCHEL (1957a). Die Unterschiede zwischen den eigenen Befunden und denen von DRISCHEL, KÜNKEL sowie TIEDT dürften teilweise auf Unterschiede in den Registrierbedingungen (sichtbares Infrarotlicht) zurückzuführen sein, zum anderen Teil aber darauf, daß diese Autoren keine Gleichstromverstärker verwendet haben (DRISCHEL: Untere Grenzfrequenz $1/20$ Hz; KÜNKEL: Zeitkonstante 3,75 sec; TIEDT: Zeitkonstante 4 sec). v.BRUNN u.Mitarb. projizierten einen horizontalen Infrarot-Lichtstreifen und registrierten so Änderungen des Pupillendurchmessers, nicht der Pupillenfläche. PETERSEN registrierte photographisch die Pupillenbewegung 4 sec lang nach Momentbelichtung und kam zu der Feststellung, daß eine längere Registrierung nötig ist, um in jedem Falle eine vollkommene Wiedererweiterung der Pupille zu erfassen. Eigene Befunde haben ergeben, daß nach 4 sec Registrierzeit in der überwiegenden Zahl der Fälle noch etwa 10 - 15 % Kontraktionsrückstand bestehen bleibt. Wir haben deshalb für unsere Untersuchungen einen Abstand von 10 sec zwischen den Lichtreizen eingehalten.

Geschlechtsunterschiede konnten wir in unserem Material nicht feststellen, was durch die kleine Zahl der Versuchspersonen bedingt sein kann. Da aber die spontane Atemfrequenz einen Einfluß auf den Reflexablauf hat und Frauen bekanntlich eine höhere Atemfrequenz besitzen als Männer (HILDEBRANDT 1958), wäre ein Geschlechtsunterschied zu erwarten. Demnach müßten

Frauen im Durchschnitt eine kürzere Kontraktions- und Dilatationszeit aufweisen als Männer.

Während viele Autoren eine lebhafte Pupillenunruhe höherer Frequenz feststellten, fanden wir bei einigen Versuchspersonen langsamere rhythmische Schwankungen der Pupillenweite, die sich als atemsynchron erwiesen. Wie schon beschrieben treten diese in der späten Wiedererweiterungsphase eines Lichtreflexes in verstärktem Maße auf, indem jede Inspiration zu einer Pupillenerweiterung führt. Abb. 13 zeigt ein Beispiel für besonders ausgeprägte atemsynchrone Schwankungen der Pupillenweite.

Außer atembedingten Pupillenweitenänderungen fanden wir bei 2 Versuchspersonen spontane Pupillenbewegungen, die den durch Licht ausgelösten Reaktionen ähnlich waren. Sie waren regellos verteilt und wiesen keine Beziehung zur Atemphase auf. Die obere Kurve der Abb. 14 zeigt solche spontanen Pupillokonstriktionen zwischen zwei im Abstand von 10 sec ausgelösten Lichtreflexen. Das Ausmaß solcher Kontraktionen kann die Größe von Reaktionen auf 100 lx-Lichtreize erreichen. Wenn die Spontankontraktion zufällig kurz vor einem Lichtreiz auftritt, wie im unteren Teil der Abb. 14, kommt es zu einer sogenannten "präliminaren Pupillenerweiterung" (BYRNE 1922), die schon von MACHEMER (1941) und v. BRUNN u. Mitarb. (1941) als eine in die Latenzzeit hinein fortgesetzte Erweiterungsphase bei spontaner Pupillenunruhe gedeutet wurde.

In Abb. 15 sind die Veränderungen der Reaktions-Amplituden bei regelmäßiger Aufeinanderfolge von Lichtblitzen im Abstand von 10 sec aufgetragen (Versuchsreihe I). Dadurch sollte geprüft werden, ob die Pupillen-Lichtreaktion unter diesen Bedingungen systematische Veränderungen erfährt.

Die getrennt aufgetragenen individuellen Verläufe sind insgesamt sehr unterschiedlich. Einige zeigen bei mehr oder weniger starker Schwankung keinerlei systematische Veränderungen über den geprüften Zeitraum von 8 min. In der Mehrzahl der Fälle ist eine Verminderung der Amplitude zu erkennen, vor allem im späteren Verlauf, welche als Ermüdung



Abb. 13 Atemsynchrone Schwankungen der Pupillenweite. Jede Inspiration führt mit gewisser Verzögerung zu einer kurzfristigen Erweiterung der Pupille. Registrierung mit größerer Empfindlichkeit als bei den anderen Kurvenbeispielen.

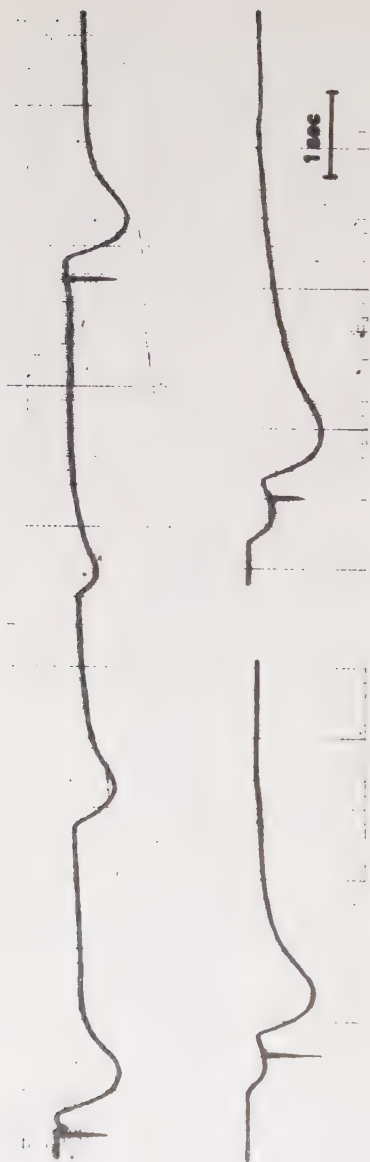


Abb. 14 Spontankontraktionen der Pupille. Oben: Zwischen 3 im Abstand von 10 sec aufgelösten Lichtreaktionen. Unten: Überlagerung von Spontankontraktion und Lichtreaktion mit dadurch bedingter "präliminärer Pupillenerweiterung" in der Latenzzeit. Beispiel oben und links unten von derselben, rechts unten von einer anderen Versuchsperson.

gedeutet werden könnte. Ferner fällt auf, daß in einigen Fällen die Reaktions-Amplitude während der ersten Minuten deutlich zunimmt. Eine solche Zunahme der Amplitude könnte durch Fortschreiten der Dunkeladaptation erklärt werden, obwohl ein Dunkelaufenthalt von mindestens 15 min bei allen Versuchspersonen eingehalten war. Durch die Justierung mit eben sichtbarem Weißlicht wurde zwar die Dunkeladaptation am Registrierauge, nicht aber die am Reizauge gestört. Da aber in diesen Fällen mit der Zunahme der Amplitude gleichzeitig die Pupillen-Ruheweite abnahm, erscheint die Dunkeladaptation als Ursache fragwürdig. Dieser letztere Befund spricht mehr dafür, daß es sich hier um eine partielle Ermüdung, und zwar des sympathischen Reaktionsanteils handeln könnte. Nach dem allgemeinen Gesetz der Ermüdung autonom-nervöser Regulationen von LÖWENSTEIN (1953) ermüden die sympathischen Zentren vor den parasympathischen. Das Kleinerwerden der Pupille mit gleichzeitiger Zunahme der Kontraktionstiefe paßt gut zu dieser Vorstellung. Durch Schwächung des Sympathikus kommt es zu einem Überwiegen des Parasympathikus.

Die Abnahme der Amplitude im weiteren Verlauf des Versuches dürfte auf einer Schwächung beider Reaktionskomponenten beruhen. LÖWENSTEIN beschreibt in zahlreichen Arbeiten das Phänomen der "Ermüdung" des Pupillen-Lichtreflexes nach Serienbelichtung von 1 sec Dauer im Abstand von 3-4 sec, und die "Entmüdung" der ermüdeten Reaktionen durch psychische und sensorische Reize (psychosensorisches Restitutionsphänomen (1952 b)). Die Ermüdung geht über Formveränderungen bis zum vollkommenen Erlöschen der Reaktion. Von anderen Untersuchern wurde dieses Phänomen bisher nicht bestätigt (v.BRUNN 1941; CÜPPERS 1954; DRISCHEL 1957a).

Im eigenen Material fanden sich jedoch neben der in Abb.15 erkennbaren allgemeinen Tendenz zur Verminderung der Lichtreaktion einige Beispiele von sehr ausgeprägten Reaktionsveränderungen, die als Ermüdung mit anschließender Entmüdung gedeutet werden können. Im oberen Teil der Abb. 16 sind die Reaktionen 1, 44 u. 45 der Versuchsperson Go. als Beispiel dafür zusammengestellt. Wie aus Abb. 15 zu entnehmen ist,

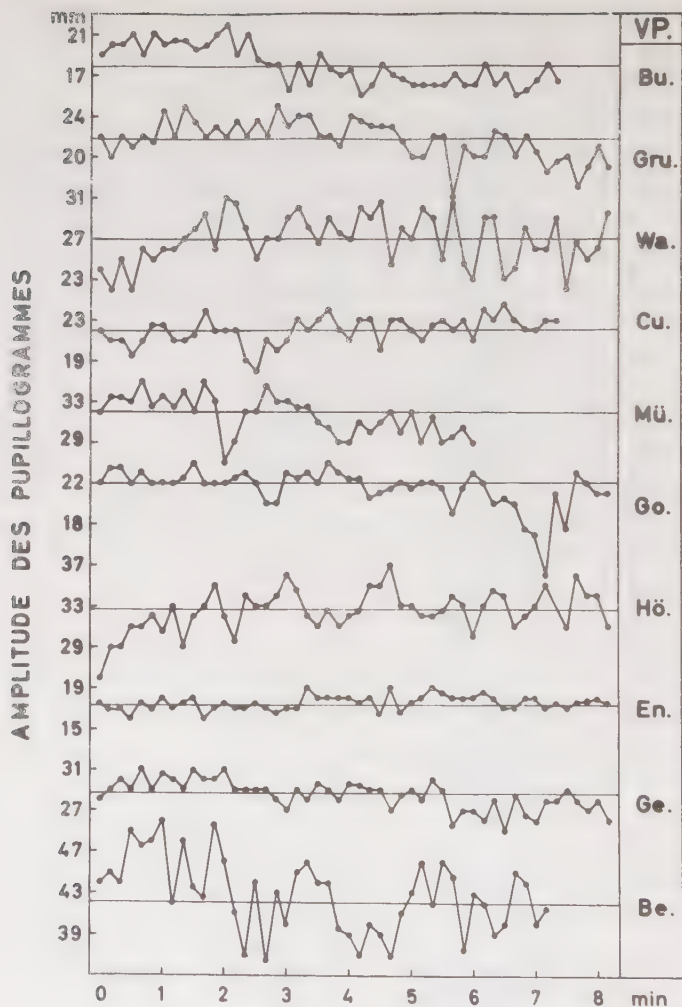


Abb. 15 Veränderungen der Reaktionsamplituden während Serienreizung im Abstand von 10 sec. (Versuchsreihe I). Ordinatenmaßstab in mm der gemessenen Amplituden.

veränderte sich in diesem Fall die Reaktion bis zum 37. Lichtblitz nur geringfügig, wurde aber dann während der folgenden 7 Reaktionen sehr stark vermindert (Tiefpunkt = 44. Reaktion), worauf wieder eine rasche Restitution erfolgte.

Zur genaueren Prüfung der Ermüdbarkeit wurde bei einer Versuchsperson eine Serie von rasch aufeinanderfolgenden Reaktionen durch Momentbelichtung ausgelöst (1/100 sec, 100 lx, Reizabstand 3 sec). Die im unteren Teil der Abb. 16 zusammengestellten Ergebnisse lassen in Übereinstimmung mit den von LÖWENSTEIN beschriebenen Veränderungen folgendes erkennen: die sekundäre Kontraktionsphase wird immer ausgeprägter bis zu einer deutlichen Verbreiterung des Minimums; ferner findet sich eine kontinuierliche Abnahme der Pupillenweite, der Amplitude, der Kontraktionsdauer, der Kontraktionsgeschwindigkeit sowie eine Zunahme der Latenzzeit. Wenn am Anfang der Serie ein Lichtreiz ausbleibt und der nächste erst im Abstand von 6 sec gesetzt wird, erfolgt eine rasche vollständige Erweiterung der Pupillen (zwischen 7. u. 8. Reaktion geprüft). Im späteren Verlauf ist dies nicht mehr der Fall, zwischen der 63. und 64. Reaktion stellte sich selbst innerhalb von 10 sec nicht wieder die Ausgangslage ein. Nach Reaktion 68 erweiterte sich die Pupille ohne erkennbare Ursache, die nächste Reaktion blieb aber zunächst noch klein, und erst die Reaktion 70 ließ eine Restitution erkennen. Die Latenzzeit war dabei sogar kürzer als bei dem ersten Lichtreflex. Der Weiterverlauf der Reaktion 70 ist durch ein Lidschlag gestört. Durch diesen Versuch ist gezeigt, daß die LÖWENSTEIN'schen Versuche auch unter den Bedingungen der Momentbelichtung reproduzierbar sind, wenn auch das Ausmaß der Ermüdung naturgemäß geringer ist als bei 1 sec-Lichtreizung.

Es soll hier nicht weiter diskutiert werden, wieweit der Begriff der "Ermüdung" für die hier beschriebenen Veränderungen, die teilweise nur vorübergehend auftreten und schnell von einer Restitution abgelöst werden können, günstig ist, oder ob man beispielsweise besser von Schwankungen des vegetativen Tonus oder von Monotonie-Zuständen sprechen sollte.



Abb. 16 Beispiele für Veränderungen des Pupillen-Lichtreflexes bei Serienreizung ("Ermüdung" und "Entmüdung").

Oben: Reizabstand 10 sec. Reaktionen 1, 44 und 45 des Versuches Go.

Unten: Reizabstand 3 sec. Ausschnitte aus einer Serie von 70 Reizen. Der späte Ablauf der Reaktion 70 ist durch einen Lidschlag gestört.

Die ausgezogene Linie gibt die Ausgangslage der Pupillenweite an. Erklärung im Text.

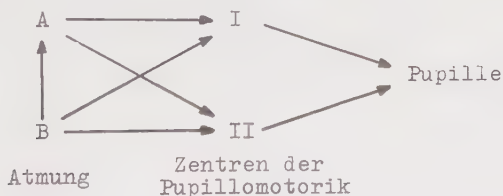
IV. Besprechung der Ergebnisse

Die nachgewiesenen Einflüsse der Atmung auf die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes können durch sehr verschiedenartige Mechanismen vermittelt werden, deren genaue Differenzierung das vorliegende Untersuchungsmaterial nicht ermöglicht. Es kann deshalb hier nur versucht werden, in Zusammenordnung mit den heutigen Kenntnissen die wahrscheinlichsten Deutungen herauszuarbeiten. Die wichtigsten Möglichkeiten, in den Pupillen-Lichtreflex einzugreifen, sind folgende:

I. Angriff an den parasympathischen Zentren der Pupillenbewegung (M.sphincter pupillae) im Oculomotorius-Kerngebiet (Mittelhirn).

II. Angriff an den sympathischen Zentren der Pupillenbewegung (M.dilatator pupillae) im Rückenmark (BUDGE'sches Zentrum, Centrum cilio-spinale).

Die Atemeinflüsse können A) direkt von den höheren Atemzentren ausgehen, oder B) von tieferen motorischen Zentren der Atmung, bzw. durch die Reafferenz der Atmung, über die Dehnungsrezeptoren der Lunge, vermittelt werden. Nach dieser groben Gliederung ergeben sich 4 Hauptmechanismen der Kopplung von Atmung und Pupillomotorik:



Bedenkt man die Vielzahl der Wirkmöglichkeiten von der Atmung auf den Pupillen-Lichtreflex, so ist es nicht verwunderlich, daß sich in den durchgeführten Versuchen nicht immer strenge "kollektive Markmalsverschiebungen", sondern mitunter auch "differenzierte Merkmalsverschiebungen" gefunden haben.

1. Respiratorische Einflüsse auf die Latenzzeit

Am zwanglosesten lassen sich die respiratorischen Einflüsse auf die Latenzzeit mit den Ergebnissen anderer Autoren zusammenordnen. DRISCHEL (1957b) fand die Latenzzeit bei verstärktem Sympathikotonus verlängert und umgekehrt bei Überwiegen des Parasympathikus verkürzt. Der inspiratorische Effekt auf die Latenzzeit bei Spontanatmung wirkt somit im Sinne einer erhöhten Sympathikotonie, was gut mit anderen bekannten Effekten der Atmung übereinstimmt, z.B. der inspiratorischen Verengung der Hautgefäße. KOEPCHEN u. Mitarb. (1961) haben im Tierversuch nachgewiesen, daß die vagalen pressorezeptorischen Herzreflexe inspiratorisch gehemmt, expiratorisch gebahnt werden, und zwar auch nach Ausschaltung der Atembewegung. Es handelt sich dabei also um direkte zentrale Wirkungen. Der analoge Mechanismus für die Koppelung Atmung-Pupille wäre $A \rightarrow I$. HILDEBRANDT u. ENGEL (1963) sowie ENGEL u. HILDEBRANDT (1964) fanden beim Menschen eine inspiratorische Verkürzung der Reaktionszeit. Die davon abweichenden Befunde von CALLAWAY (1965) könnten darauf beruhen, daß in diesen Untersuchungen der spontane Atemablauf gestört war.

Die Tatsache, daß die respiratorischen Einflüsse auf die Latenzzeit bei willkürlicher Atemverlangsamung geringer werden und zwischen den Werten bei inspiratorischem und expiratorischem Atemstillstand kein Unterschied mehr besteht, spricht dafür, daß für die Einflüsse bei Spontanatmung überwiegend der Mechanismus $A \rightarrow I$ verantwortlich zu machen ist. Die sympathischen Zentren (II) können bei der Latenzzeit nicht mitwirken. Hätte $B \rightarrow I$ eine große Bedeutung, so wären bei Atemverlangsamung mit verstärkten Atemexkursionen auch verstärkte respiratorische Schwankungen der Latenzzeit zu erwarten.

Aus dem Überwiegen des Mechanismus $A \rightarrow I$ bei den Einflüssen auf die Latenzzeit läßt sich schließen, daß die Latenzzeit die zentrale respiratorische Tendenz am getreuesten wiedergibt. Dem entspricht auch gut der Kurventyp für die Latenzzeit in Abb. 11. Zunächst setzt mit Inspiration die typische Verlängerung von t_L ein, aber noch während der

willkürlich vertieften Einatmung, die ja entgegen der spontanen Atemtendenz erfolgt, geht die Latenzzeit schon wieder zurück.

TIEDT (1963) fand im Tagesgang kurze Latenzzeiten während des Tages und verlängerte Zeiten in der Nacht, obwohl in der vegetativen Gesamteinstellung am Tag der Sympathikotonus überwiegt. Dieses Ergebnis ist gut verständlich, wenn man bedenkt, daß einerseits Ermüdung mit einer Verlängerung der Latenzzeit einhergeht und andererseits der Sympathikus auf diese Größe einen relativ geringen Einfluß ausübt.

2. Respiratorische Einflüsse auf den Ablauf des Pupillen-Lichtreflexes

Nach den Atemeinflüssen auf die Latenzzeit wären für den weiteren Ablauf des Pupillen-Lichtreflexes folgende Veränderungen zu erwarten, wenn man von dem Konzept der "kollektiven Merkmalsverschiebung" von DRISCHEL (1957 b u. c) ausgeht: Inspiratorisch müßte sich der Reflextyp mehr zur "hyperkinetischen" und expiratorisch mehr zur "hypokinetischen" Form hin verschieben. Für die einzelnen Größen würde das während Inspiration bedeuten:

Eine Verlängerung von $t_{K/2}$,
eine geringe Verkürzung oder Konstanz von t_K ,
eine Verkürzung von $t_{D/2}$ und $t_{D/4}$.

Lediglich die geringen Veränderungen von t_K (Abb. 5 u. 6) entsprechen diesen Extrapolationen. Sowohl $t_{K/2}$ wie auch $t_{D/4}$ verhalten sich deutlich entgegengesetzt. Der von uns gefundene gegensinnige Verlauf von t_L und $t_{K/2}$ entspricht den Beobachtungen von KÜNKEL (1961) bei intraindividuellen Spontanschwankungen der Pupillen-Kerngrößen im Zeitraum von mehreren Minuten, was KÜNKEL irrtümlich als Übereinstimmung mit den Befunden von DRISCHEL wertete. TIEDT (1963) fand in Übereinstimmung mit KÜNKEL, im Gegensatz zu DRISCHEL gleichsinnige Änderungen von $t_{K/2}$ und den Dilatationszeiten (entsprechend unserer $t_{D/4}$).

Besonders schwierig sind die Deutungen im Hinblick auf die Dilatations-Viertelwertszeit. KÜNKEL fand, in Übereinstimmung

mit der dynamischen Typologie von DRISCHEL, bei intraindividuellen Spontanschwankungen ein gegensätzliches Verhalten von t_L und Dilatationszeiten. Unsere Ergebnisse in Abb. 5 u. 6 scheinen dem zunächst zu widersprechen. Die Aufgliederung der Mittelwerte in die individuellen Verläufe in Abb. 7 zeigt jedoch, daß die respiratorischen Variationen von $t_{D/4}$ im interindividuellen Vergleich qualitativ verschieden sein können. Ein Kollektiv von 10 Personen ist natürlich zu klein, um zu entscheiden, welche Verlaufsform normal ist. Es kommt ferner hinzu, daß die Atemeinwirkung auf den Pupillenreflex eine komplexe ist. Faßt man beispielsweise den Atemeinfluß auf den Verlauf der Wiedererweiterung ins Auge, indem man $t_{D/4}$ vom Endpunkt her der Atmung zuordnet, wie das in Abb. 7b) geschehen ist, so ergibt sich eine inspiratorische Verkürzung der Wiedererweiterungszeit. Die von DRISCHEL beschriebene Merkmalskoppelung ist also auch bei den Atemeinflüssen auf die Pupillendynamik nachweisbar, nur kommt ihr keine strenge Allgemeingültigkeit zu. Es gibt darüberhinaus auch selektive Einflüsse auf Teilkomponenten der Pupillomotorik, wodurch die bevorzugten Merkmalskoppelungen durchbrochen werden können.

Die Atemeinflüsse auf $t_{D/4}$ lassen sich in mehrere Komponenten aufgliedern.

a) Ein zentraler Einfluß auf die parasympathischen Zentren (Mechanismus $A \rightarrow I$), welcher streng an den Latenzzeit-Effekt gekoppelt ist. Die Auswirkung dieses Einflusses müßte bei Spontanatmung besonders deutlich sein, da unter diesen Bedingungen die Latenzzeit-Effekte besonders ausgeprägt sind. Es ist am wahrscheinlichsten, daß der "frühe" Einfluß der Atmung, der eine inspiratorische Verlängerung von $t_{D/4}$ bewirkt, über $A \rightarrow I$ vermittelt wird. Dafür spricht die Feststellung von LÖWENSTEIN (1953), daß bei Hemmungen des Westphal-Endinger-Kernes die Wiedererweiterung träge wird.

b) Der "späte" Einfluß der Atmung auf $t_{D/4}$, welcher mit erheblicher Latenz zu einer inspiratorischen Verkürzung von $t_{D/4}$ führt. Dieser dürfte wohl auf dem Wege $A \rightarrow II$ vermittelt werden. Daß dieser Effekt jedenfalls über II läuft,

ist auch aus der respiratorischen Pupillenunruhe in Abb. 14 zu vermuten. Wieweit hier ein Mechanismus $B \rightarrow II$ mitwirkt, läßt sich nicht entscheiden.

c) Eine selektive Wirkung im Sinne von $B \rightarrow II$ muß aus dem Verhalten bei willkürlich verlangsamter Atmung und Atemanhalten geschlossen werden. Die Atem-Amplitude von $t_{D/4}$ wird mit Verstärkung der Atemexkursion vergrößert, während die Latenzzeitschwankungen reduziert werden. $t_{D/4}$ kann über diesen Mechanismus in relativ enger Bindung an die Atembewegungen inspiratorisch verkürzt werden.

3. Zum Konzept der "kollektiven Merkmalsverschiebung"

DRISCHEL (1957 b u. c) fand bei korrelationsstatistischer Analyse der Pupillendynamik an 493 Personen recht strenge Beziehungen zwischen den verschiedenen zeitlichen Kennwerten des Pupillen-Lichtreflexes, die auch bei pharmakologischen Beeinflussungen erhalten blieben. Er sprach deshalb von einer "kollektiven Merkmalsverschiebung" bei Einflüssen auf die Pupillendynamik.

LÖWELSTEIN u. LOEWENFELD haben demgegenüber stets mehr die differenzierte Struktur des Pupillen-Lichtreflexes und die Möglichkeiten selektiver Änderungen betont. Das liegt einerseits daran, daß sie auch die pathologischen Änderungen mit einbezogen und dementsprechend die neurologisch-diagnostischen Aspekte stark beachtet haben. Ferner haben sie in tierexperimentellen Studien experimentelle Läsionen gesetzt und auf diese Weise selektive Änderungen erzeugt. Ein direkter Vergleich unserer Ergebnisse mit den Erfahrungen der Arbeitsgruppe von LÖWELSTEIN ist deshalb schwierig, weil LÖWELSTEIN u. Mitarb. lange Lichtreize (um 1 sec) angewandt haben.

Nun haben unsere Untersuchungen über die respiratorischen Einflüsse ergeben, daß die "differenzierte Merkmalsverschiebung" bei intraindividuellen, endogenen Umstellungen ein völlig normales Phänomen ist, welches schon bei Spontanatmung oder leichten willkürlichen Eingriffen in die Atmung regelmäßig zutage tritt. Auch in den tagesrhythmischen Studien von TIEDT sowie in den Untersuchungen von KÜNKEL haben

sich schon Befunde ergeben, die sich nicht dem Prinzip der "kollektiven Merkmalsverschiebung" einordnen lassen. Deshalb kann das Prinzip der "kollektiven Merkmalsverschiebung" nicht als durchgängig gültig für die physiologischen Einflüsse auf die Pupillendynamik anerkannt werden, es gilt vorwiegend für die von DRISCHEL geprüften interindividuellen Variationen und gibt für die übrigen Bereiche vielleicht eine gewisse bevorzugte Ordnung an.

Da sich die von DRISCHEL beschriebene Merkmalskoppelung nicht durchgängig findet, ist auch eine Festlegung zweier Extremtypen im Sinne der "hyperkinetischen" und "hypokinetischen" Reaktionsform nach DRISCHEL kaum möglich. Es kommt hinzu, daß manche Merkmale, die DRISCHEL diesen Typen zuordnet, nicht recht zu den Typennamen passen, wenn man dies mit den Beschreibungen der Reaktionsdynamik in anderen Bereichen vergleicht. Wir haben deshalb davon abgesehen, diese Typenbezeichnung zu übernehmen.

V. Zusammenfassung

Mit Hilfe der Infrarot-Reflexphotometrie wurde am Menschen die konsensuelle reflektorische Pupillenverengung nach Lichtblitzen (1/100 sec) fortlaufend aufgezeichnet. Durch Ausmessung bestimmter zeitlicher Kennwerte eines solchen Reflexablaufes können die dynamischen Merkmale der Pupillenreaktion sehr genau erfaßt werden. Da der Reflexverlauf sowohl sympathischen wie auch parasympathischen Einflüssen unterliegt, ist die Pupillen-Dynamik auch ein empfindlicher Indikator für Änderungen des vegetativen Tonus. In dieser Arbeit wurde geprüft, wieweit spontane, im Zyklus der Atmung ablaufende vegetative Tonusschwankungen die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes beeinflussen. Die Atmung wurde mit Hilfe einer abdominal angelegten pneumatischen Manschette mitregistriert.

Die Messungen wurden unter drei verschiedenen Atembedingungen durchgeführt: bei Spontanatmung, bei willkürlich ver-

langsamer Atmung sowie bei inspiratorischem und expiratorischem Atemstillstand. Insgesamt wurden bei 10 gesunden Versuchspersonen 737 Lichtreaktionen registriert.

1. Bei Spontanatmung zeigen die Kennwerte des Pupillen-Lichtreflexes folgende Änderungen: inspiratorisch (Lichtreiz während der Inspiration) werden die Latenzzeit (t_L) verlängert, die Kontraktion beschleunigt (Kontraktions-Halbwertszeit $t_{K/2}$ und Kontraktionszeit t_K verkürzt), das Ausmaß der Pupillenverengung (Amplitude A) reduziert und die Wiedererweiterung verzögert (Dilatations-Viertelwertszeit $t_{D/4}$ verlängert).

2. Die respiratorischen Schwankungen von $t_{D/4}$ wiesen eine besonders große Variabilität auf und wurden deshalb näher analysiert. Ordnet man $t_{D/4}$ nicht vom Lichtreiz, sondern vom Endpunkt dieser Kenngröße her der Atmung zu, so zeigt sich ein entgegengesetzter Verlauf: die Inspiration führt mit gewisser Verzögerung zu einer Beschleunigung der Wiedererweiterung. Bei dieser Art der Zuordnung ist zwar die Gesamtamplitude der respiratorischen Schwankungen von $t_{D/4}$ geringer, aber die individuell aufgegliederten Einzelverläufe zeigen ein einheitlicheres Verhalten als bei der Zuordnung vom Lichtreiz her. Daraus wird gefolgert, daß $t_{D/4}$ einem doppelten Einfluß von Seiten der Einatmung unterliegt: a) einem frühen Effekt, der bald nach dem Lichtreiz den Reflexablauf im Sinne einer langsamen Wiedererweiterung modifiziert, und b) einem späten Effekt, der direkt in den Verlauf der Wiedererweiterung beschleunigend eingreift.

3. Bei willkürlich verlangsamter Atmung sind die respiratorischen Einflüsse auf die Latenzzeit (t_L) vermindert, die auf $t_{D/4}$ jedoch verstärkt. Dies darf so gedeutet werden, daß die Latenzzeit mehr von der spontanen Tendenz des Atemzentrums, der Verlauf der Wiedererweiterung hingegen stärker von dem Atemablauf unmittelbar abhängt.

4. Die Ergebnisse bei Atemstillstand stützen die Deutung von Punkt 3. Während sich für die Latenzzeit kein Unterschied zwischen inspiratorischer und expiratorischer Thoraxeinstellung fand, wies $t_{D/4}$ wieder deutliche Differen-

zen auf. Die bei inspiratorischem Anhalten gefundene Verlängerung von $t_{D/4}$ wird als Folge einer zentralen expiratorischen Tendenz gedeutet.

5. Die Mittelwerte der einzelnen Kennzeiten sind von der individuellen spontanen Atemfrequenz abhängig. Diese Korrelation ist wiederum für $t_{D/4}$ besonders stark, während t_L gar keine derartige Abhängigkeit erkennen läßt. Bei willkürlicher Verminderung der Atemfrequenz bleibt der Mittelwert von $t_{D/4}$ jedoch unverändert.

6. Verschiedene Befunde zur Ermüdung des Lichtreflexes, über spontane Pupillenkonstriktionen sowie über respiratorische Pupillenunruhe werden dargelegt.

7. Die mannigfaltigen Einflüsse der Atmung auf die Dynamik des Pupillen-Lichtreflexes werden an Hand eines einfachen Schemas diskutiert. Die Atem-Effekte können an den parasympathischen Zentren oder an den sympathischen Zentren der Pupillenbewegung angreifen, und sie können von höheren Atemzentren oder von tieferen, mit der Atemmotorik strenger gekoppelten Zentren ihren Ausgang nehmen. So ergibt sich eine Vier-Gliederung der möglichen Einwirkungen.

8. Das Konzept der "kollektiven Merkmalsverschiebung" nach DRISCHEL wird eingehend diskutiert. Die strenge Kopplung zwischen verschiedenen Merkmalen des Pupillen-Lichtreflexes, die DRISCHEL sowohl in variationsstatistischen Untersuchungen an einer großen Personengruppe wie auch bei Einwirkung von Pharmaka fand, gilt nicht für intraindividuelle, atemrhythmische Veränderungen. Es finden sich im Gegenteil sehr ausgeprägte "differenzierte Merkmalsverschiebungen". Gerade dies läßt die Pupillographie als einen besonders interessanten Indikator für vegetative Tonusschwankungen erscheinen.

Mittlere individuelle Kennwerte des Pupillen-Lichtreflexes in Abhängigkeit der spontanen Atemfrequenz. Ergebnisse von 436 Reaktionen an 10 Versuchspersonen.

Vp.	Geschlecht	Zahl der Reaktionen	Atemfrequenz min	Atemperiodendauer sec	Kennwerte des Pupillen-Lichtreflexes (msec)				
					t_L	$t_{K/2}$	t_K	$t_{D/2}$	$t_{D/4}$
Bu.	w.	42	27,3	2,2	228	203	590	11250	2255
Gru.	m.	50	25,0	2,4	213	160	540	1180	2190
Wa.	w.	48	22,2	2,7	240	191	650	1480	2460
Cu.	m.	38	17,6	3,4	238	212	680	1480	2450
Mü.	w.	31	16,2	3,7	225	183	700	1590	2680
Go.	m.	46	12,8	4,7	198	197	640	1550	3150
Hö.	m.	47	11,3	5,3	232	203	645	1445	2370
En.	m.	45	11,1	5,4	242	207	630	1455	3310
Ge.	m.	49	10,1	5,9	240	187	670	1480	3090
Be.	w.	40	9,1	6,6	242	220	725	1570	3190
Mittelwerte:		43,6	16,3	4,2	230	196	647	1448	2715

T a b e l l e 2

Mittlere individuelle Kennwerte des Pupillen-Lichtreflexes bei Spontanatmung und willkürlich verlangsamter Atmung. Ergebnisse bei verlangsamter Atmung von 205 Reaktionen bei 6 Versuchspersonen.

Vp.	Zahl der Reaktionen spontan langsam	Atemperiodendauer(sec)	t_K (msec)	$t_{D/4}$ (msec)			
		spontan	langsam	Diff.%	spontan	langsam	Diff.%
Bu.	42	2,2	6,7	204	590	603	+ 2,2
Wa.	48	2,7	8,3	207	650	664	+ 2,2
Go.	46	4,7	12,4	164	640	633	- 1,1
Hö.	47	5,3	17,3	226	645	667	+ 3,4
En.	45	5,4	17,5	224	630	622	- 1,3
Ge.	49	5,9	15,4	161	670	654	- 2,4
Mittelwerte:	46	4,4	12,9	197	627	641	+ 0,5%
					2775	2880	+ 4,2%

Tabelle 3

Mittlere individuelle Kennwerte des Pupillen-Licht-reflexes (msec) bei inspiratorischer und expiratorischer Apnoe. Ergebnisse von 96 Reaktionen an 6 Versuchspersonen

Diff.: Differenz des Mittelwertes zu den Mittelwerten bei Spontanatmung

Vp.		Gru.	Wa.	Go.	Hö.	En.	Be.	Mittelwert
Spontane AF (min^{-1})		25	22	13	11	11	9	15
Zahl der Reaktionen	Insp.	6	11	9	9	5	9	8
	Exsp.	5	11	9	8	5	9	8
t_L	Insp.	228	230	202	231	245	255	232
	Exsp.	229	226	203	229	242	251	230
	Mittelwert	228	228	202	230	244	253	231
	Diff.%	+ 7,0	- 5,0	+ 2,0	- 0,9	+ 0,8	+ 4,5	+ 1,4
$t_{K/2}$	Insp.	208	189	203	225	223	217	211
	Exsp.	207	205	214	234	224	225	218
	Mittelwert	208	197	208	229	223	221	214
	Diff.%	+ 30,0	+ 3,1	+ 5,6	+ 12,8	+ 7,7	+ 0,5	+ 10,0
t_K	Insp.	622	662	688	675	670	744	676
	Exsp.	613	675	695	677	663	753	680
	Mittelwert	618	668	692	676	667	748	678
	Diff.%	+ 14,8	+ 2,8	+ 8,1	+ 4,8	+ 5,9	+ 3,2	+ 6,6
$t_{D/2}$	Insp.	1320	1685	1900	1570	1530	1700	1617
	Exsp.	1290	1648	1810	1465	1490	1700	1567
	Mittelwert	1305	1667	1855	1520	1510	1700	1592
	Diff.%	+ 10,6	+ 12,6	+ 19,7	+ 5,2	+ 3,8	+ 8,3	+ 10,0
$t_{D/4}$	Insp.	3175	3690	4600	3610	4170	3600	3808
	Exsp.	3000	3110	3700	2740	3340	3350	3207
	Mittelwert	3098	3400	4150	3200	3755	3475	3508
	Diff.%	+ 41,5	+ 38,2	+ 31,7	+ 35,0	+ 13,4	+ 9,0	+ 28,1

Ergebnisse verschiedener Autoren über den zeitlichen Verlauf des Pupillen-Lichtreflexes nach Momentbelichtung.

A u t o r	Kenngrößen des Pupillen-Lichtreflexes (msec)					
	t_I	$t_K/2$	t_K	$t_D/2$	$t_D/4$	$t_D/10$
v. BRUNN u. Mitarb. (1941)	273 (250-300)	176 (150-200)	504 (400-580)	1013 (700-1400)	-	-
PETERSEN (1956)	200 (160-300)	-	500 Halte- zeit (200-700)	-	-	-
DRISCHEL (1957)	230 (150-330)	223 (90-380)	484 (260-700)	876 (590-1270)	-	1281 (850-2000)
KÜNKEL (1961)	245 (155-325)	145 (95-235)	375 (315-535)	665 (575-1045)	-	910 (735-1400)
TIEDT (1963)	227	159	462	856	-	1462
EIGENE BEFUNDE	230 (187-253)	196 (150-250)	647 (500-766)	1448 (966-1800)	2715 (1570-4000)	-

Literatur

- BACH, L.: Pupillenlehre. Anatomie, Physiologie und Pathologie. Methodik der Untersuchung.
Karger, Berlin 1908
- BEHR, C.: Die Lehre von den Pupillenbewegungen.
Handbuch der ges. Augenhk. 3. Aufl. Springer, Berlin 1924
- BELLARMINOFF, L.: Anwendung der graphischen Methode bei Untersuchung der Pupillenbewegungen. Photocoreograph.
Pflügers Arch. ges. Physiol. 37, 107-122 (1885)
- BLEICHERT, A. u. R. WAGNER: Versuche zur Erfassung des Pupillenspieles als Regelungsvorgang.
Z. Biol. 109, 70-80 (1957)
- BLEICHERT, A. u. R. WAGNER: Über den Frequenzgang der Pupillenreaktion auf Licht.
Z. Biol. 109, 281-296 (1957)
- BRUNN, W. v., R. FALK, H. MATTHES u. K. MATTHES:
Untersuchungen über die Pupillenreflexe beim Menschen.
Pflügers Arch. ges. Physiol. 244, 644-658 (1941)
- BUMKE, O.: Pupillenstörungen bei Geistes- und Nervenkrankheiten.
2. Aufl. Fischer, Jena 1911
- BYRNE, J.: Preliminary dilatation a phase of the pupillary light reflex.
Am. J. Physiol. 61, 369-372 (1922)
- CALLAWAY, E.: Some effect of respiratory and cardiac cycles.
The Langley Porter Neuropsychiatric Institute
San Francisco, California.
Pre-publication copy 20. 1. 1965
- CÜPPERS, C.: Die fortlaufende Registrierung der direkten und der konsensuellen Pupillenreaktion.
Graefes Arch. f. Ophthalm. 155, 588-616 (1954)

- DÖRING, G.K. u. E.SCHAEFERS: Über die Tagesrhythmik der Pupillenweite bei Menschen. \ Pflügers Arch.ges.Physiol. 252, 537-541 (1950)
- DRISCHEL, H.: Untersuchungen über die Dynamik des Lichtreflexes der menschlichen Pupille. I. Mitteilung. Pflügers Arch.ges.Physiol. 264, 145-168 (1957a)
- DRISCHEL, H.: Untersuchungen über die Dynamik des Lichtreflexes der menschlichen Pupille. II. Mitteilung. Pflügers Arch.ges.Physiol. 264, 169-190 (1957b)
- DRISCHEL, H.: Experimentelle Untersuchungen über den Lichtreflex der menschlichen Pupille nach kurzdauerndem Lichtreiz. Klin.Mbl.f.Augenhk. 131, 740-755 (1957c)
- DRISCHEL, H.: Pupillogramm, Hautleitwerte und galvanischer Hautreflex; Untersuchungen über den Einfluß von Veritol und Pilocarpin. Pflügers Arch.ges.Physiol. 283, R 62 (1965)
- ENGEL, P. u. G.HILDEBRANDT: Atemrhythmische Schwankungen der Reaktionszeit nach Atemanhalten. Pflügers Arch.ges.Physiol. 280, 333-336 (1964)
- HESS, C.v.: Pupille. Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. Bd. XII/1, 176-186 (1929)
- HESS, E.H.: Attitude and pupil size. Scientific American 212, 46-54 (1965)
- HILDEBRANDT, G.: Die rhythmische Funktionsordnung von Puls und Atmung. Habilitationsschrift. Marburg/Lahn (1958)
- HILDEBRANDT G., u. P.ENGEL: Der Einfluß des Atemrhythmus auf die Reaktionszeit. Pflügers Arch.ges.Physiol. 278, 113-129 (1963)
- HORNUNG, J. u. J.STEGEMANN: Ein nichtlineares kybernetisches Modell für die Pupillenreaktion auf Licht. Z.Biol. 114, 25-48 (1963)

KOEPCHEN, H.P., P.H.WAGNER u. H.D.LUX: Über die Zusammenhänge zwischen zentraler Erregbarkeit, reflektorischem Tonus und Atemrhythmus bei der nervösen Steuerung der Herzfrequenz.

Pflügers Arch.ges.Physiol. 273, 443-465 (1961)

KÜNKEL, H.: Beitrag zu einer regeltheoretischen Analyse der Pupillenreflexdynamik.

Kybernetik 1, 69-75 (1961)

LOEWENFELD, I.E.: Über die Aufzeichnung des Pupillenspiels und die nervöse Steuerung der Pupillenreflexe.

Graefes Arch.f.Ophth. 157, 628-655 (1956)

LÖWENSTEIN, O.: Der psychische Restitutionseffekt.

Benno Schwabe, Basel 1937

LÖWENSTEIN, O.: Die Bedeutung psychischer Vorgänge für das biologische Gesamtgeschehen.

Verlag "Öffentliches Leben", Frankfurt/Main 1953

LÖWENSTEIN, O., and E.D.FRIEDMAN: Present state of pupillography; its method and diagnostic significance.

Arch.of Ophthalm. 27, 969-993 (1942)

LÖWENSTEIN, O., and I.W.LÖWENFELD: Disintegration of central autonomic regulation during fatigue and its reintegration by psychosensory controlling mechanisms. I. Disintegration.

J.nerv.ment.Dis. 115, No.1 (1952a)

LÖWENSTEIN, O., and I.E.LÖWENFELD: Disintegration of central autonomic regulation during fatigue and its reintegration by psychosensory controlling mechanisms. II. Reintegration.

J.nerv.ment.Dis. 115, No.2 (1952b)

LÖWENSTEIN, O., and I.E.LÖWENFELD: Electronic pupillography.

Arch.of Ophthalm. 59. 352-363 (1958)

- MACHEMER, H.:** Über die sogenannte Prälinimarerweiterung der Pupille beim Lichtreflex.
Klin.Mbl.Augenheilk. 106, 398-405 (1941)
- MATTHES, K.:** Über die Registrierung von Bewegungsvorgängen mit dem lichtelektrischen Reflexionsmesser.
Klin.Wschr. 20, 295-297 (1941)
- PETERSEN, P.:** Die Pupillographie und das Pupillogramm. Eine methodologische Studie.
Acta physiol.scand. 37, Suppl. 125 (1956)
- STARK, L.:** Stability, oscillations and noise in the human pupil servomechanism.
Proc. I.R.E. 47, 1925-1939 (1959)
- STARK, L., and P.M.SHERMAN:** A servoanalytic study of consensual pupil reflex to light.
J.Neurophysiol. 20, 17-26 (1957)
- STEGEMANN, J.:** Über den Einfluß sinusförmiger Leuchtdichteänderungen auf die Pupillenweite.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 264, 113-122 (1957)
- TIEDT, N.:** Die 24 Stunden-Rhythmik der Kinetik des Lichtreflexes der menschlichen Pupille.
Pflügers Arch.ges.Physiol. 277, 458-472 (1963)
- VARJU, D.:** Der Einfluß sinusförmiger Leuchtdichteänderungen auf die mittlere Pupillenweite und auf die subjektive Helligkeit.
Kybernetik 2, 33-43 (1964a)
- VARJU, D.:** Pupillenreaktionen auf sinusförmige Leuchtdichteänderungen.
Kybernetik 2, 124-127 (1964b)
- WEILER, K.:** Untersuchung der Pupille und der Irisbewegungen beim Menschen.
Berlin 1910.

Am Ende der Arbeit danke ich Herrn Priv.-Dozent Dr.med. K. GOLENHOFEN für die Überlassung des Themas, das ständige Interesse und die unermüdliche Förderung, die er der Arbeit entgegengebracht hat.

Herrn Prof. Dr. med. H. HENSEL, Direktor des Physiologischen Instituts, der mir die Möglichkeit gab, an seinem Institut zu arbeiten, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls danken.

Herrn Prof. Dr. med. W. STRAUB bin ich für die freundliche Übernahme des Correferats zu besonderem Dank verpflichtet.

Lebenslauf

Am 18. April 1935 wurde ich als Sohn des Beamten Géza Petrányi und seiner Frau Ilona, geb. Kanyuscsák, in Győr, Ungarn geboren.

Nach dem Besuch der Grundschule in Győr wurde ich im selben Ort in das Révai József Gymnasium aufgenommen, wo ich am 9. Juni 1953 die Reifeprüfung ablegte. Danach arbeitete ich als Büroangestellter. Nach der Revolution im Oktober 1956 habe ich Ungarn verlassen müssen. Über Österreich kam ich in die Bundesrepublik Deutschland.

In dem Sommer-Semester 1957 begann ich das Studium der Medizin an der Philipps-Universität Marburg/Lahn. Hier bestand ich am 30. Oktober 1961 das Physikum und schloß das Studium am 15. April 1965 mit dem medizinischen Staatsexamen ab.

Nach dem Staatsexamen war ich von Mai 1965 bis November 1965 am Physiologischen Institut der Philipps-Universität als Medizinalassistent tätig.

Seit Dezember 1965 arbeite ich in dem Hygiene-Institut dieser Universität.

Meine akademischen Lehrer waren in Marburg die Herren Professoren und Dozenten:

Beckmann, Berendes, Bickel, Braun-Falco, Bücher, Dimroth, Exner, Gedigk, Golenhofen, Grebe, Gross, Hartmann, Hensel, Heuser, Hildebrandt, Hornung, Huber, Jakob, Lang, Linneweh, Lübbers, Mahr, Martini, Mattes, Maurath, du Mesnil de Rochemont, Müller, Neubauer, Niessing, Petry, Pirson, Rollhäuser, Sauer, Schleyer, Schmid, Schmitz, Schölmerich, Schwaiger, Seidel, Siegert, Siess, Stein, Straub, Streicher, Walcher, Wendt, Würterle.

